

STROJNIŠKI

VESTNIK 4

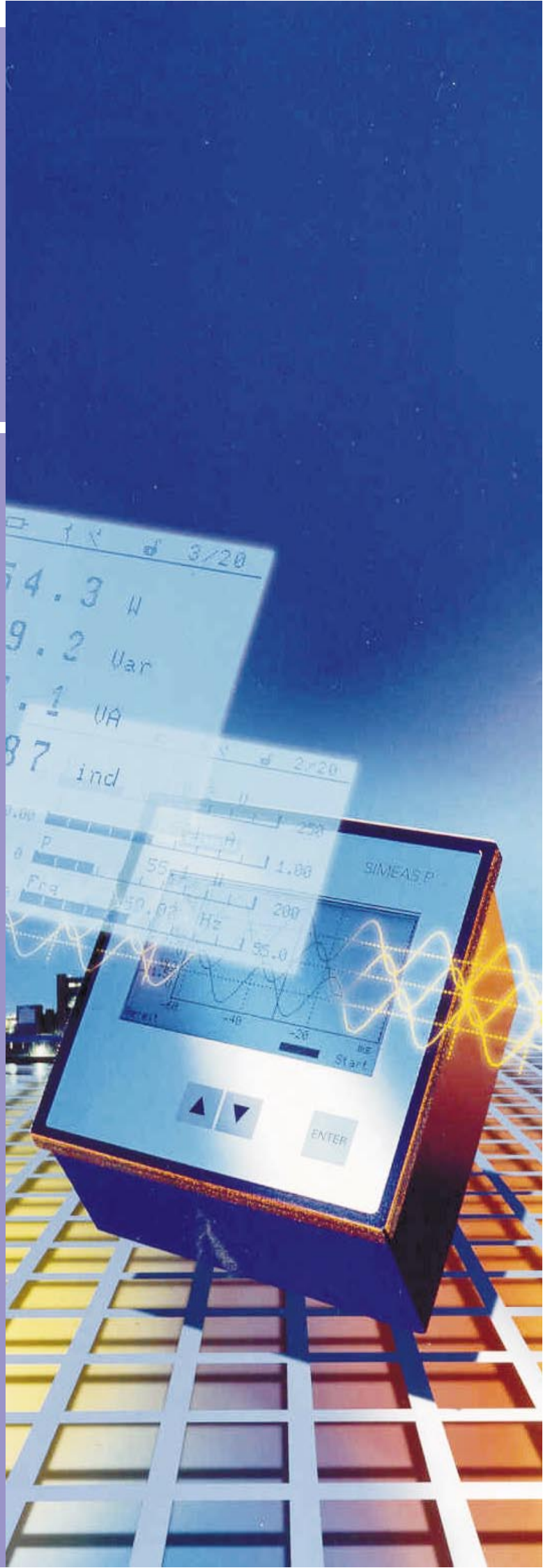
JOURNAL OF MECHANICAL ENGINEERING

strani - pages 193 - 242

ISSN 0039-2480 . Stroj V . STJVAX

cena 800 SIT

1. Primernost reakcije magnezijevega oksida z vodo za uporabo v kemičnem hralnilniku toplote
The Suitability of Magnesium Oxide and Water for Use in Chemical Heat Storage
2. Računsko reševanje inverznega problema oblikovanja nadzvočne šobe
A Numerical Solution to the Inverse Problem of Supersonic-Nozzle Design
3. Naprava s pnevmatično aktivno površino: Razvoj prototipa in Ljapunovova analiza stabilnosti
A Pneumatic Active-Surface Device: Prototype Design and Lyapunov Stability Analysis
4. Projektna naloga kot strategija vzgojno-izobraževalnega dela
The Project Task as a Strategy for Education-Training Activities



Vsebina

Contents

Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering
letnik - volume 48, (2002), številka - number 4

Razprave

- Kato, Y., Cerkvnik, B., Minakami, A., Yoshizawa, Y.:
Primernost reakcije magnezijevega oksida z
vodo za uporabo v kemičnem hranilniku toplote 194
Martinis, V., Matijašević, B., Tuković, Ž.: Računsko
reševanje inverznega problema oblikovanja
nadzvočne šobe 210
Uran, S., Šafarič, R., Winther, T.: Naprava s
pnevmatično aktivno površino: Razvoj
prototipa in Ljapunovova analiza stabilnosti 218
Papotnik, A.: Projektna naloga kot strategija
vzgojno-izobraževalnega dela 234

Osebnosti

Navodila avtorjem

Papers

- Kato, Y., Cerkvnik, B., Minakami, A., Yoshizawa,
Y.: The Suitability of Magnesium Oxide and
Water for Use in Chemical Heat Storage
Martinis, V., Matijašević, B., Tuković, Ž.: A
Numerical Solution to the Inverse Problem of
Supersonic-Nozzle Design
Uran, S., Šafarič, R., Winther, T.: A Pneumatic
Active-Surface Device: Prototype Design and
Lyapunov Stability Analysis
Papotnik, A.: The Project Task as a Strategy for
Education-Training Activities

Personal Events

Instructions for Authors

Primernost reakcije magnezijevega oksida z vodo za uporabo v kemičnem hranilniku toplote

The Suitability of Magnesium Oxide and Water for Use in Chemical Heat Storage

Yukitaka Kato - Boštjan Cerkvenc - Atsushi Minakami - Yoshio Yoshizawa

Zaradi velikih gostot energije lahko kemične toplotne črpalke uporabimo tudi kot hranilnike toplote. Z uporabo povračljivih kemičnih reakcij, s krmiljenjem toka tekočine, ki reagira, lahko toploto shranimo in sproščamo glede na zunanje potrebe. V primeru zadovoljive ponovljivosti lahko kemične reakcije uporabimo v hranilnikih toplote, ki se lahko vključijo v sedanje kogeneracijske sisteme. Z uporabo kemične toplotne črpalke lahko uravnotežimo obremenitev kogeneracijskih sistemov. Odvečno toploto v času manjšega odjema toplote s kemično reakcijo shranimo v hranilniku, v času koničnih obremenitev pa jo sprostim s povratno reakcijo.

V tem prispevku je govor o izvedljivosti kemične toplotne črpalke, ki uporablja reakcijo magnezijevega oksida z vodo. V tem primeru lahko med reakcijo dehidracije magnezijevega hidroksida toploto shranimo pri temperaturi 300 °C do 400 °C, ali jo med hidracijo magnezijevega oksida oddamo pri temperaturi 100 °C do 200 °C. Da bi preverili uporabnost magnezijevega hidroksida kot reakcijskega sredstva za toplotne črpalke, smo eksperimentalno izvedli reakcijski postopek v območju tlakov med 30 kPa in 203 kPa. Kot reaktorsko sredico v valjastem reaktorju smo uporabili posebej pripravljen reaktant – $Mg(OH)_2$, z dobro večkratno ponovljivostjo reakcije. Krog delovanja naprave je sestavljen iz endotermnega postopka dehidracije magnezijevega hidroksida ter eksotermnega postopka hidracije magnezijevega oksida. Krog smo ponavljali v različnih obratovalnih razmerah, ki so značilne za delovanje hranilnika toplote v kogeneracijskem sistemu. Med postopkom reakcije smo v obeh smereh merili razporeditev temperature ter reagiran delež v reaktorski sredici. Na koncu smo preverili tudi dejansko izvedljivost reaktorja ter povprečno specifično moč reaktorja.

© 2002 Strojniški vestnik. Vse pravice pridržane.

(Ključne besede: črpalke toplotne kemične, shranjevanje energije, oksidi magnezijevi, kogeneracija)

Because of their high energy density, chemical heat pumps are an interesting possibility for heat storage. With reversible chemical reactions the heat can be stored or released on demand by controlling the flow of the reactive fluid. If they prove to have satisfactory repeatability, the reversible reactions can also be used in a heat storage system for cogeneration systems. In this way it would be possible to even out the load of the cogeneration system: in a period of low heat demand the surplus heat is stored with the chemical reaction in the heat storage and during a peak load period it can be released with the reverse reaction.

In this paper we discuss the operation of a chemical heat pump that uses the reaction between magnesium oxide and water. In this case the heat can be stored with a dehydration process at about 300–400 °C and released with a hydration process at about 100–200 °C. In order to test the potential of magnesium hydroxide as a reactive medium for heat pumps we performed reaction experiments over a range of operation pressures between 30 kPa and 203 kPa. For the experiment, a specially prepared reactant with good properties for repetitive operation was packed in a cylindrical reactor. The experimental cycle consisted of an endothermic dehydration of the magnesium hydroxide for the heat storage, and an exothermic hydration of the magnesium oxide for the heat release. The cycle is repeated under various operating conditions that are characteristic for a heat-storage operation of a cogeneration system. Both directions of the reversible reaction were studied by measuring the reactor-bed temperature distribution and the reacted fraction changes. We conclude with a discussion of a practical application and the mean heat output rate of the reactor.

© 2002 Journal of Mechanical Engineering. All rights reserved.

(Keywords: chemical heat pumps, heat storage, magnesium oxide, cogeneration)

0 UVOD

Prispevek poskuša predstaviti uporabnost povračljivih reakcij v kemičnih toplotnih črpalkah, ki bi jih uporabili za izkoriščanje presežkov toplot v kogeneracijskih sistemih ter za dvig energijske učinkovitosti tovrstnih sistemov. Kemična toplotna črpalka, s katero spreminjamo temperaturno raven toplote z uporabo kemičnih reakcij, je eden izmed načinov za shranjevanje in izkoriščanje toplote. Zaradi zadovoljive ponovljivosti ter razmeroma velike gostote energije smo naše delo osredotočili na povračljive reakcije kovinskih oksidov z vodo.

Osnove kinetike reakcij magnezijevega in kalcijevega oksida z vodo, ki sta v našem primeru najbolj zanimivi, je predstavil Hartman [1]. Fujii je opravil osnovne meritve primernosti kalcijevega oksida za shranjevanje energije [2]. Kasneje je za isto reakcijo objavil tudi eksperimentalne rezultate o dinamiki procesa hidracije in dehidracije [3]. Kinetiko kemične reakcije kalcijevega oksida z vodo, ki jo lahko uporabimo v kemični toplotni črpalki za izkoriščanje odvečne toplote, je predstavil tudi Kamimori [4]. Poleg tega je Ogura [5] reakcijo tudi eksperimentalno preveril za primer uporabe v sušilnem sistemu.

Nasprotno je Cerkvénik [6] uporabil reakcijo kalcijevega oksida z vodo za hlajenje. Zaradi nizkih delovnih tlakov, do 15 mbar, ki povzročajo manj intenziven prenos snovi do reakcijskih mest v reaktorju, in zaradi nizke toplotne prevodnosti kalcijevega oksida, je uporabil novo grafitno matrično strukturo. Zaradi grafita v matrici se toplotna prevodnost reaktorske sredice v primerjavi s samim oksidom poveča. Poleg tega je v drugih delih ([7] in [8]) predstavil uporabo kalcijevega oksida kot soli v krovnem postopku kaskadne sorpcijske naprave. S tem korakom lahko dosegamo višja toplotna grelnohladilna števila (GHŠ - COP) kakor s samostojno napravo. Standardne delovne temperature so med dehidracijo 500 °C do 600 °C (shranjevanje energije) in med hidracijo 200 °C do 300 °C (uporaba energije).

Kinetika kemične toplotne črpalke z magnezijevim oksidom/vodo je bila že predstavljena [9]. Na podlagi ravnotežne krivulje je bilo ugotovljeno [9], da lahko toplotna črpalka z magnezijevim oksidom/vodo shranjuje odpadno toploto pri temperaturi 300 °C ter jo oddaja v večji količini pri temperaturah med 100 °C in 150 °C, če delujemo v podtlaku. Za boljšo ponovljivost reakcije je bil magnezijev oksid posebej pripravljen v zelo fini prašni obliki ([10] in [11]). Da bi preverili uporabnost tako pripravljenega magnezijevega oksida, smo izvedli laboratorijsko eksperimentalno napravo ([12] in [13]).

Da preverimo praktično uporabnost toplotne črpalke, je treba eksperimentalno napravo natančno pripraviti. Razlog je zahteven termodinamičen sistem v reaktorju zaradi poteka kemične reakcije, ki vključuje prenos toplote in snovi. Za delovanje eksperimentalne

0 INTRODUCTION

In this paper we attempt to show how it might be possible to use surplus heat and the reversible reaction in a chemical heat pump to enhance the energy efficiency of a cogeneration system. A chemical heat pump, which manages the heat transformation via a chemical reaction, is one of the possibilities for a heat-storage and heat-utilisation system. Because of the satisfactory repeatability of the reversible reactions between metal oxides and water and their relatively high heat density our work has focused on these reactions.

The basic reaction kinetics of the reactions between water and the oxides of magnesium and calcium have already been reported [1]. Fujii has performed basic measurements on calcium oxide as a heat-storage medium [2] and published the experimental results on hydration and dehydration process dynamics [3]. The reaction between calcium oxide and water as a heat-storage system for utilising surplus energy has also been discussed kinetically [4]. In addition, the same reaction was examined experimentally by Ogura et al. [5] as a drying system.

In contrast, Cerkvénik [6] used the reaction between calcium oxide and water for cooling purposes. Because of the low operating pressures of less than 15 mbar, which causes a less intense mass transport to the reaction sites in a reactor, and because of the low thermal conductivity of the calcium oxide, he used a novel graphite matrix structure. As a result of the graphite in the matrix the thermal conductivity of the reactor bed, which is low when only the salt is used, was increased. In other works ([7] and [8]) he used calcium oxide as a topping cycle in a cascading sorption device. With this step a higher heating/cooling ratio COP could be reached, similar to a stand-alone device. The standard operating temperatures are 500–600 °C for dehydration (heat storage) and 200 °C for hydration (heat utilization).

A chemical heat pump using magnesium oxide and water was described in terms of reaction kinetics [9]. A thermobalance experiment showed that the magnesium oxide and water heat pump is capable of storing waste heat at around 300 °C and rejecting the stored heat between 100 and 150 °C for sub-atmospheric pressures. To improve the repeatability of the reaction a new reactant made from ultra-fine magnesium-oxide powder and purified water was prepared ([10] and [11]). A laboratory-scale heat pump was setup to observe the heat-storage ability for a particular type of reactant in the reactor ([12] and [13]).

A detailed bed-reactor experiment is necessary in order to evaluate the practical performance of the heat pump because the reactor bed is a complex thermodynamic system in which chemical reactions involving heat and mass transfer proceed simultaneously. The experimental heat-pump

naprave v prejšnjih študijah ([12] in [13]) je bilo potrebno mehansko delo zaradi omejitve izvedbe kondenzacije med postopkom shranjevanja toplote. Da smo se izognili neekonomični rabi energije, smo rabo mehanske energije izločili. Poleg tega je nov preskus zasnovan pri visokih tlakih, ki so potrebni, če želimo kemično toplotno črpalko uporabiti v kogene-racijskem sistemu.

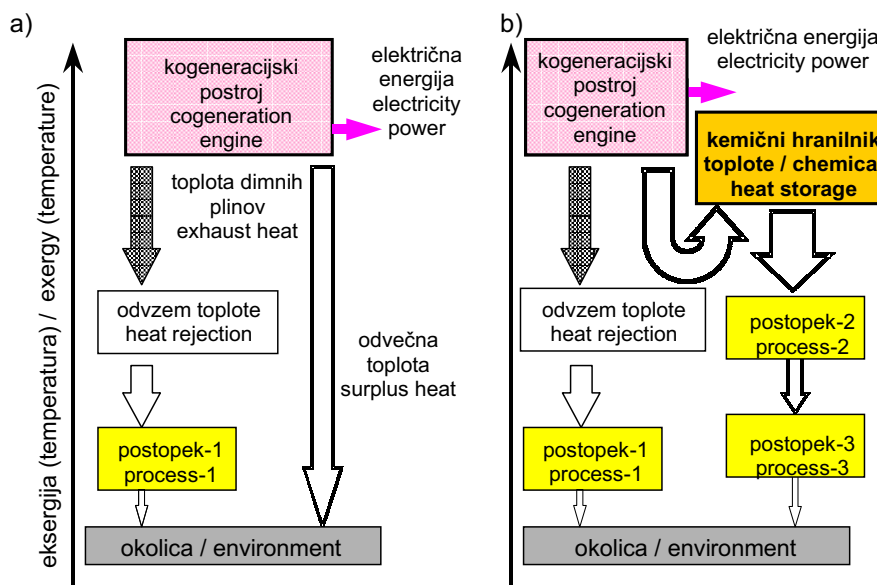
1 SHRANJEVANJE ENERGIJE V KOGENERACIJSKEM SISTEMU

Namen raziskav kemičnih toplotnih črpalk je povečanje energijske učinkovitosti običajne kogeneracije z uporabo zmožnosti kemičnega shranjevanja energije. Običajni kogeneracijski postroj, ki je predstavljen na sliki 1a, uporablja dizelski agregat ali malo plinsko turbino za proizvodnjo električne energije ter toploto motorja in izpušnih plinov za proizvodnjo toplote. Ker se ponavadi poraba toplote ne ujema z enakomerno proizvodnjo električne energije, moramo večje količine odvečne toplote občasno odvajati v okolico.

apparatus in the previous study ([12] and [13]) required mechanical work because of a design restriction on the condensation in the heat-storage process. To avoid uneconomical energy consumption, the use of mechanical work must be avoided. Moreover, a study of the heat-output operation under higher pressures is also required to expand the applicability of the heat pump for use with the cogeneration system.

1 HEAT STORAGE IN A COGENERATION SYSTEM

In our case the chemical heat pump is developed to enhance the energy efficiency of a conventional cogeneration system by using its chemical heat-storage ability. A conventional cogeneration system, which is shown in Figure 1a, uses a diesel engine or micro-gas-turbine for the electrical output and the heat from the engine or the exhaust gases for the heat output. However, because the demand for the electrical output is generally inconsistent with that of the heat output, a large amount of surplus heat is occasionally discharged into the environment.



Sl. 1. Uporaba kemičnega toplotnega hranilnika v kogeneracijskem sistemu. (a) toplotni tokovi v običajnem kogeneracijskem sistemu, (b) toplotni tokovi v primeru kombiniranega sistema kogeneracije in kemičnega hranilnika toplote

Fig. 1. Application of a chemical heat-storage system in a cogeneration system: (a) thermal flow of a conventional cogeneration system, (b) thermal flow of a combined system for chemical heat storage and cogeneration

Z uporabo kemičnega hranilnika toplote lahko povečamo učinkovitost porabe grelna toplote kogeneracijskega sistema. Predlagan sistem je predstavljen na sliki 1b. Hranilnik toplote deluje izmenično, v načinu shranjevanja in načinu sproščanja toplote. Ko poteka v reaktorju hranilnika toplote endotermni proces, hranilnik polnimo (način shranjevanja toplote) z uporabo odvečne toplote, ki je na voljo iz kogeneracijskega postroja. V načinu

With the use of chemical heat storage the energy efficiency of a cogeneration system could be enhanced. The proposed system is shown in Figure 1b. The heat storage is operated in batch mode between heat-input mode and heat-output mode. In the heat-input mode an endothermic dehydration reaction takes place in the heat-storage reactor by consuming the surplus heat that is generated in the cogeneration system. In the heat-output mode an

praznjenja (sproščanje toplote) v reaktorju hranilnika toplote poteka eksotermna reakcija hidracije, zaradi česar se sprošča reakcijska toplota. Ker lahko kemični hranilnik shrani toploto za dalj časa v obliki ločenih kemičnih reaktantov in ker lahko spreminjamo temperaturo reakcije z izbiro reakcijskih pogojev, je omogočeno sproščanje toplote po potrebi na različnih temperaturnih ravneh. Rezultat tega je, da je toplota s kemičnim hranilnikom toplote bolj izkoriščena kakor z običajnim sistemom hranilnika toplote.

1. 1 Shranjevanje toplote z uporabo povračljivih reakcij

Učinkovitost sistema shranjevanja energije temelji na termodinamičnih lastnostih materialov, ki jih uporabimo za shranjevanje. V primeru uporabe reakcij v hranilnikih energije sta potrebni lastnosti velika gostota shranjevanja energije in povračljivost reakcij. Na sliki 2 smo pripravili primerjavo gostote energij fizikalnih in kemičnih sprememb, ki jih lahko uporabimo za shranjevanje energije. Pri primerjavi ne bomo upoštevali dejstva, da je gostota shranjevanja energije v vseh sistemih v veliki meri odvisna od zgradbe posod za shranjevanje energije. Vsaka dodatna masa, ki je potrebna za delovanje sistema, npr. masa prenosnika toplote ali masa sekundarne tekočine, zmanjša dejansko gostoto shranjevanja energije.

Gostota energije je v primeru kemičnih sprememb razmeroma večja od gostot v primeru fizikalnih sprememb. Kemične spremembe, npr. oksidacija, so nepovračljive ter tako težko uporabne za krožno delovanje hranilnika toplote. Zato je pričakovano, da imajo povračljive kemične reakcije potencial za shranjevanje energije v sistemih izkoriščanja energije prihodnosti.

Med fizikalnimi spremembami so adsorpcijski in absorpcijski postopki po gostoti shranjevanja energije najbolj zanimivi. Obstaja že več študij o uporabnosti zeolitov in podobnih materialov za shranjevanje grelne ali hladilne toplote ([14] in [15]). Zeoliti so zaradi relativno velike gostote energije okoli 3200 kJ/kg adsorbirane vode, dostikrat uporabljeni v tovrstnih sistemih. Nasprotno je zanimanje za absorpcijski hranilnik toplote, v obliki ločenega topila in močne raztopine, manjše. V določenih primerih se ju uporablja za premagovanje nestalne razpoložljivosti pogonskega vira toplote ([16] in [17]). Da dosežemo povečanje celotne učinkovitosti kogeneracijskega sistema, lahko absorpcijski postopek uporabimo tudi drugače. Če absorpcijsko hladilno napravo uporabimo kot dopolnilni sistem k sedanjemu kogeneracijskemu sistemu ([18] in [19]), potem preraste sistem v zahtevnejši trigeneracijski sistem. Zanj je značilno, da lahko s hkratno porabo grelne toplote za ogrevanje in hlajenje, dosežemo večjo izkoriščenost razpoložljive toplote.

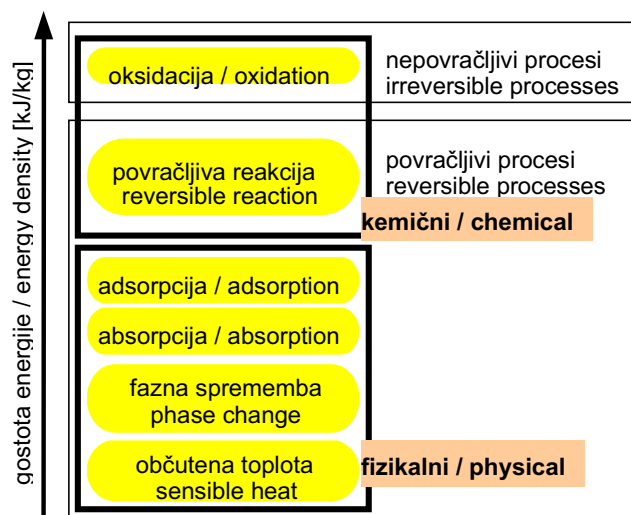
exothermic hydration reaction process takes place in the reactor generating a reaction heat output. Because the heat-storage system can store heat for a long period in the form of separated chemical reactants, and the heat-output temperature can be varied by choosing the reaction conditions, then the heat output can be supplied on demand at various temperature levels. As a consequence, the surplus heat in the chemical heat storage is utilized more efficiently than with a conventional heat-storage system.

1. 1 Heat storage using a reversible chemical reaction

The thermal performance of a heat-storage system depends on the thermodynamic properties of the heat-storage materials. The reactions in heat-storage systems require materials with a high heat-storage density and a reaction reversibility. In Figure 2 is a comparison of the energy densities of physical and chemical changes for heat storage. In this comparison we will not consider the fact that the density of the energy stored in all cases depends on the construction of the heat-storage vessels. Every additional mass that is required for the system's operation, i.e. the mass of the heat exchanger or the mass of the secondary fluid, diminishes the practical energy density.

The energy density of the chemical changes is higher than that of the physical changes. Chemical changes such as oxidation are irreversible and hard to apply in cyclic heat-storage operations. Thus, reversible chemical reactions are expected to have the most potential for heat storage in future energy-utilization systems.

Of the physical changes the adsorption and the absorption processes are, because of their high energy density, the most interesting for heat-storage systems. There were already several studies using zeolites and similar materials for hot or cold storage ([14] and [15]). Due to the relatively high energy densities of about 3200 kJ/kg of water, zeolites are often used in such systems. In contrast, the interest in absorption heat storage in the form of a separated solvent and a strong solution is less. There is, however, some research into using this kind of storage for overcoming the discontinuous availability of a driving heat source ([16] and [17]). The absorption processes can also be used in a different way to improve the overall efficiency of the cogeneration system. If they are used to complement a standard cogeneration system ([18] and [19]), the cogeneration system expands to become a more complex trigeneration system. With such systems a simultaneous heat consumption during heating and cooling, and an increased exploitation of available heat, could be achieved.



Sl. 2. Primerjava gostote energije kemičnih in fizikalnih postopkov, ki se lahko uporabijo za shranjevanje toplote
Fig. 2. Comparison of the energy density of chemical and physical processes for heat storage

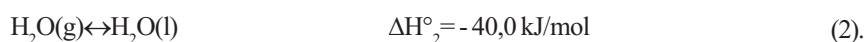
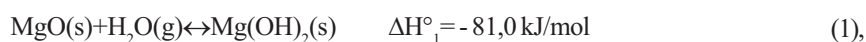
Občutena toplota, ki pomeni občuteno segrevanje in ohlajanje snovi, in fazne spremembe so kot fizikalni postopki zelo razširjeni v običajnih sistemih shranjevanja toplote. Občutene toplote kot fizikalnega postopka ne moremo neposredno primerjati z drugimi postopki na sliki 2. Razlog je v tem, da je moč sistema, ki izkorišča občuteno toploto, odvisna od temperaturnega dviga toplote in ne od fizikalne ali kemične spremembe.

Pri vseh drugih fizikalnih in kemičnih postopkih je prav tako navzoč postopek občutenega segrevanja in hlajenja. Zato lahko za samostojen postopek občutene toplote predpostavimo, da je gostota energije nižja kakor pri drugih postopkih ter postopek kot tak manj primeren za velike sisteme shranjevanja toplote.

V nadaljevanju bo natančneje predstavljena povračljiva reakcija magnezijevega oksida in vode, ta se je izkazala kot najprimernejša za uporabo v kemičnem hranilniku toplote, ki bi ga lahko vezali na kogeneracijski sistem. Preostali kovinski oksidi, ki reagirajo z vodo [8], so zaradi previsokih delovnih temperatur v našem primeru neprimerni.

1. 2 Kemična toplotna črpalka z magnezijevim oksidom in vodo

Kemično toplotno črpalko, ki uporablja povračljivo reakcijo magnezijevega oksida z vodo za shranjevanje in izkoriščanje energije, je teoretično raziskovalo že več avtorjev ([9], [20] in [21]). Kemični postopek v tovrstni toplotni črpalki temelji na naslednjem ravnotežju:



Toplotna črpalka omogoča shranjevanje grelnе energije med postopkom dehidracije magnezijevega

sensible heat (Fig. 2), which represents the sensible heating and cooling of matter, and the phase changes, is usually used in conventional heat-storage systems. Sensible heat, as a physical process, cannot be directly compared with the other processes in Figure 2. The reason is that the power of the system that uses the sensible heat depends on the temperature increase and not on a physical or chemical change.

In the same way, sensible heating and cooling are present in all other processes. Therefore, we can assume that for an independent sensible process that the energy density is low in comparison with the other processes and that the process is less suitable for larger storage systems.

In the following, the reversible magnesium oxide and water reaction, which is found to be the most appropriate for use in the heat-storage system as part of a cogeneration system, will be presented in more detail. This is due to the fact that the operating temperatures in the case of other metal-oxide reactions with water are far above the level that is required for a cogeneration system [8].

1. 2 A chemical heat pump using magnesium oxide and water

Chemical heat pumps that use a reversible magnesium oxide and water reaction to promote heat storage and energy utilisation have been examined by different authors ([9], [20] and [21]). The chemical process in such a heat pump is based on the following equilibrium:

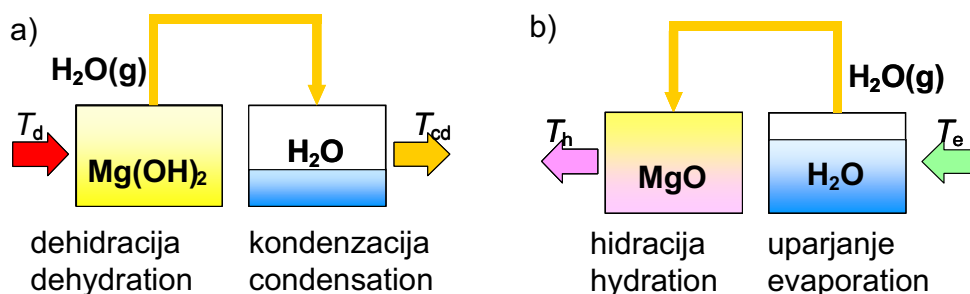
The heat pump enables thermal energy to be stored via the dehydration of magnesium

hidroksida (smer v desno, enačba 1) in glede na potrebe sproščanje shranjevalne energije s hidracijo magnezijevega oksida (smer v levo, enačba 1). Načelo delovanja je predstavljeno na sliki 3. Toplotna črpalka v osnovi sestoji iz dveh delov, reaktorja z magnezijevo soljo ter hranilnika z vodo.

Med shranjevanjem toplote (sl. 3a) magnezijev hidroksid v reaktorju dehidriramo z odvečno toploto na temperaturni ravni T_d . Para, ki se sprošča med dehidracijo, kondenzira v hranilniku z vodo na temperaturni ravni T_{cd} . Med sproščanjem toplote (sl. 3b) poteka v reaktorju hidracija magnezijevega oksida, pri čemer se sprošča toplota na temperaturni ravni T_h . V uparjalniku – hranilniku z vodo, pa se voda uparja pri temperaturi T_{ev} , za kar lahko uporabimo nizkotemperaturno toploto, npr. toploto zunanjega zraka ali izpušnih plinov.

hydroxide (right direction, Equation 1) and then released on demand via the hydration of magnesium oxide (left direction, Equation 1). The principle of operation is shown in Figure 3. The heat pump consists of a reactor with a magnesium salt and a water reservoir.

In heat-storage mode (Figure 3a) the magnesium hydroxide ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) is dehydrated by surplus heat at the temperature T_d . The generated vapour is then condensed in the reservoir at T_{cd} . In heat-output mode (Fig. 3b) the magnesium oxide is hydrated. The water vapour that is used in the reaction evaporates in the reservoir at the temperature T_{ev} . A low-temperature heat source, which is required for the evaporation process, could be obtained from the surrounding air.



Sl. 3. Delovanje kemične toplotne črpalke: (a) shranjevanje toplote, (b) sproščanje toplote
Fig. 3. Operation of chemical heat pump: (a) heat-storage mode, (b) heat-output mode

Prednosti pred običajnim hranilnikom toplote sta višja temperatura in večja gostota shranjevanja odvečne toplote ali toplote dimnih plinov, zanesljivost, cenovna in ekološka sprejemljivost reaktantov ter dolgotrajno shranjevanje toplote. Pri tem 'toploto' hranimo v obliki ločenih reaktantov, npr. magnezijevega oksida in vode, ki sta ob ponovnem stiku po daljšem obdobju zmožna takojšnje reakcije.

The advantages of a chemical heat pump are the higher temperatures and energy densities of the stored heat; this is combined with reactant materials that are safe, economical and environmentally friendly. Besides this, a longer-term heat storage is possible than with conventional heat storage. This means that the 'heat' is stored in the form of separated reactants, e.g. magnesium oxide and water, which are capable of instant reaction when they are brought into contact after a long period.

2 PRESKUS

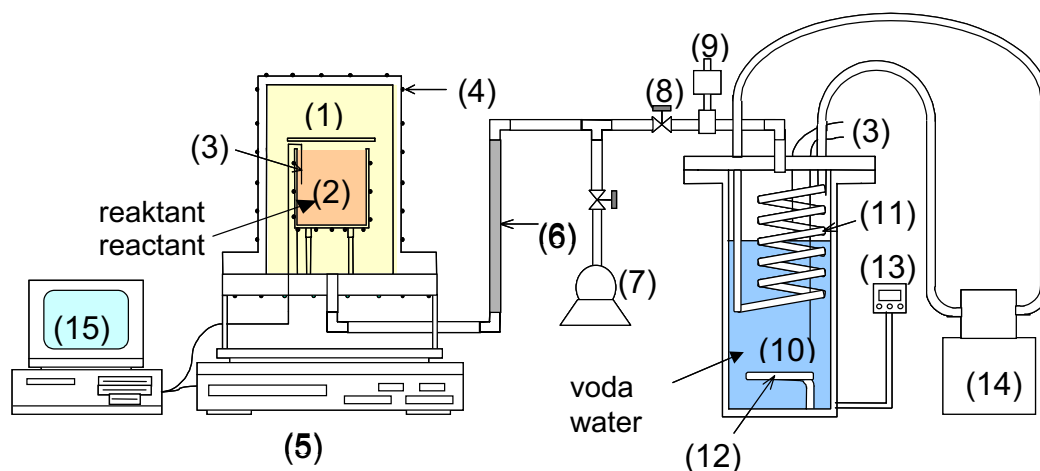
2 EXPERIMENT

Eksperimentalna, toplotno gnana kemična toplotna črpalka, ki je bila sestavljena v Raziskovalnem laboratoriju za nuklearne reaktorje na Japonskem, je predstavljena na sliki 4. Toplotna črpalka se sestoji iz reaktorja (1) v reakcijski komori in vodnega rezervoarja (10). Posodi sta povezani z gibljivimi cevmi (6) in zapornim ventilom (8). Temperaturi v obeh posodah krmilimo z električnimi grelniki (4) in (12) in dodatnim cevnim prenosnikom toplote (11). Para potuje med posodama samo zaradi tlačne razlike. Reakcijska komora je dodatno izolirana in ogrevana, kar omogoča krmiljenje zunanje temperature reaktorja.

A schematic diagram of our experimental, thermally driven chemical heat pump, which was built at the Research Laboratory for Nuclear Reactors, in Japan, is shown in Figure 4. The heat pump consists of a reactor (1) in a reaction chamber and a water reservoir (10). Both vessels are connected with a flexible tube (6) and a stop valve (8). The temperatures in the vessels are controlled with electric heaters (4) and (12). In addition, the temperature and thus the pressure in the reservoir are controlled with an additional heat-exchanger tube (11). The vapour is transported between the vessels through the stop valve by the pressure difference alone. The reaction chamber is additionally insulated and externally heated, which allows us to control the external temperature of the reactor.

S spreminjanjem tlaka se spreminja tudi togost gibljive cevi (6), kar vpliva na merjenje teže reaktorja.

By changing the pressure the stiffness of the hose (6) changes and influences the weight



Sl. 4. Shema eksperimentalne toplotno gnane kemične toplotne črpalke z magnezijevim oksidom in vodo: (1) reaktor v reakcijski posodi, (2) reaktant - reaktorska sredica, (3) termoelementi, (4) grelnik, (5) tehtnica, (6) gibljiva cev, (7) vakuumska črpalka, (8) zaporni ventil, (9) varnostni ventil, (10) hranilnik vode, (11) grelna cev, (12) grelnik, (13) tlačni pretvornik, (14) termostatisirana kopel, (15) računalnik
Fig. 4. Schematic diagram of an experimental, thermally driven, magnesium oxide and water, chemical heat pump: (1) reactor in a reaction chamber, (2) reactant – reactor bed, (3) thermocouples, (4) electric heater, (5) balance, (6) hose, (7) vacuum pump, (8) stop valve, (9) safety valve, (10) water reservoir, (11) heating tube, (12) electric heater, (13) pressure transducer, (14) thermostat bath, (15) computer

Da smo se izognili dodatni merilni negotovosti, smo v prejšnjih meritvah določili odvisnost med spremembo teže ter obratovalnim tlakom. Reagiran delež smo izračunali po popravku izmerjene teže glede na obratovalni tlak.

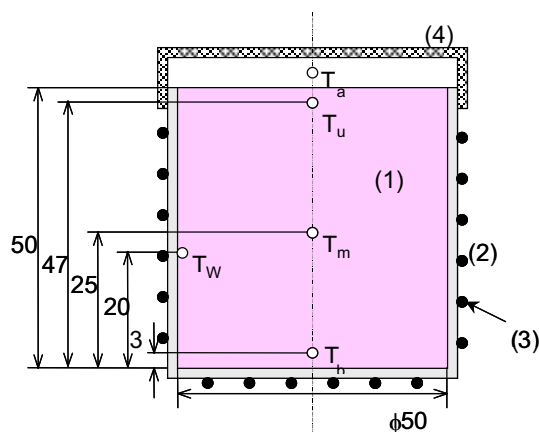
Na sliki 5 je predstavljen valjasti reaktor z reaktorsko sredico (2). Reaktor je narejen iz nerjavnega jekla, z notranjim premerom 50 mm ter višino 50 mm. Ob postavitvi je bilo v reaktorju 53 g $\text{Mg}(\text{OH})_2$ s povprečnim premerom zrn 1,5 mm. Temperaturo v reaktorju smo vzdrževali z električnim grelnikom, ki je nameščen na zunanji površini reaktorja (3 na sliki 5). Termoelementi so nameščeni na različnih mestih v reaktorski sredici, kakor je prikazano na sliki 5. Za zmanjšanje toplotnih izgub smo reaktor pokrili z izolacijskim pokrovom. Tlak v reaktorju oz. tlak pare, ki smo ga merili s tlačnim pretvornikom, smo vzdrževali s krmiljenjem temperature v hranilniku z vodo. Zato smo uporabili dodaten prenosnik toplote in grelnik (11 in 12 na sliki 4). Da smo lahko določili hitrost reakcije, smo med meritvami s tehtnico merili spremembe teže reaktorja (5 na sliki 4).

Magnezijev hidroksid, ki smo ga uporabili ob postavitvi preskusne naprave, smo pripravili iz zelo drobnega magnezijevega oksida v obliki prahu (povprečen premer delcev: 10 nm, UBE Materials Co. Ltd.) ter vode. Prah magnezijevega oksida smo hidrirali s prečiščeno destilirano vodo ter zmleli v krogelnem mlinu. Po postopku hidracije smo gosto zmes posušili ter nastale kosmiče presejali.

To eliminate the additional measurement uncertainty we separately determined the weight change that is induced by a pressure change and by operational pressure in earlier measurements. The reacted fraction is calculated after the weight change is corrected with regard to the operational pressure.

In Figure 5 a detail of the cylindrical, packed-bed reactor (2) is presented. The reactor is made of stainless steel with an inner diameter of 50 mm and a height of 50 mm. At the beginning 53 g of $\text{Mg}(\text{OH})_2$ (average grain diameter of 1.5 mm) was charged in the reactor. The reactor's temperature was maintained independently by the electric heater, which is mounted on the outer surface of the reactor (depicted as (3) in Fig. 5). Thermocouples were installed at various points in the reactor bed in order to measure the change in the bed temperature. The positions and notations of the thermocouples are depicted in Figure 5. A cap (4) was installed to enhance the thermal insulation of the upper bed surface. The reaction pressure, i.e. the pressure of the vapour, was monitored by a pressure transducer. The pressure level was maintained by controlling the temperature of the reservoir water using a heat-exchanger tube and an electric heater: (11) and (12) in Fig. 4. The weight change of the reactor during the measurements was measured directly with a balance: (5) in Fig. 4.

The magnesium hydroxide that was used during the setting-up of the experimental device was produced from an ultra-fine magnesium-oxide powder (avg. particle diameter: 10 nm, UBE Materials Co. Ltd.) and water. The ultra-fine oxide powder was hydrated with purified water in a ball mill. After the hydration process, the pasty product was dried and the resulting flakes were sieved.



○ : termoelement / thermocouple

Sl. 5. Skica reaktorja: (1) reakcijska sredica - reaktant, (2) posoda reaktorja, (3) električni grelnik, (4) izolacijski pokrov

Fig. 5. Packed bed reactor: (1) reactor bed - reactant, (2) reactor, (3) electric heater, (4) insulation cap

2. 1 Preskusni postopek

Vsaka meritev je bila sestavljena iz večkratnega ponavljanja kroga delovanja hranilnika toplote, postopkov dehidracije in hidracije. Zaradi poprej preverjene stabilne reaktivnosti izbranih snovi, smo se pri vsaki meritvi omejili na 24 zaporednih postopkov dehidracije in hidracije. Ker smo v prvih petih postopkih izmerili manjši padec reaktivnosti, smo v analizi rezultatov primerjali reaktivnosti med 6. in 20. postopkom meritve. Meritve smo izvedli v različnih razmerah reakcije.

Razen za začetno vakuumiranje preostalih plinov iz naprave, sistem ni potreboval dodatnega mehanskega dela za črpanje.

V načinu shranjevanja toplote smo $Mg(OH)_2$ v reaktorju dehidrirali. Zaporni ventil (8 na sliki 4) je bil na začetku zaprt. S kroženjem hladilne vode prek prenosnika toplote v rezervoarju z vodo smo krmilili tlak vodne pare v krmilniku ter posredno tudi tlak dehidracije. Temperaturo reaktorja smo krmilili z električnim grelnikom na zunanji strani reaktorja. Kot rezultat dehidracije sta nastala MgO in voda. Po odprtju zapornega ventila smo nastalo vodno paro kondenzirali v hranilniku z vodo. Na koncu reakcije smo zaprli zaporni ventil. Napredovanje reakcije in razmere v napravi smo merili s tehtnico in vgrajenimi termoelementi.

Pri načinu praznjenja hranilnika (faza hidracije), smo hranilnik z vodo grel, zato da smo dosegli načrtovano tlačno raven reakcije. Temperaturo reaktorja in njegove okolice smo vzdrževali pri načrtovani temperaturi hidracije, ki je bila za $25^\circ C$ višja od temperature nasičenja vode, zato da smo se izognili kondenzaciji pare v napravi. Ko sta temperaturi reaktorja in hranilnika dosegli ustaljeno stanje, smo z odprtjem zapornega ventila omogočili prenos pare iz rezervoarja do reaktorja. Magnezijev oksid je reagiral s paro, pri čemer se je sprostila reakcijska toplota.

2. 1 Experimental procedure

Each measurement consisted of an operational cycle: the dehydration and hydration process. Because the chosen reactants were found to be stable [11], we limited the experiment to 24 successive cycles of dehydration and hydration. Because we measured a slight reactivity drop during the first 5 cycles we compared the reactivities of the 6th to the 20th cycle. The measurements were conducted for different reaction conditions.

Apart from an initial removal of residual gases from the device using a vacuum pump, the system did not require any additional mechanical pump work.

In heat-storage mode the $Mg(OH)_2$ is dehydrated. The stop valve, (8) in Fig. 4, was initially closed and a water coolant was circulated in the heat-exchanger tube in the water reservoir. The dehydration pressure was controlled with the water-vapour pressure in the reservoir. The reactor temperature was controlled with an external electric heater. As a result of the dehydration process, MgO and water are generated. When the stop valve was opened, the generated vapour condensed in the water reservoir. At the end of the reaction the stop valve was closed. The reaction progress and the conditions in the device were measured with the balance and the thermocouples.

In the heat-output (hydration) mode the water reservoir was heated to generate a specified reaction vapour pressure. The reactor and reaction-chamber temperatures were maintained at a predetermined hydration temperature, which is $25^\circ C$ higher than the vapour temperature, in order to avoid vapour condensation. After the reactor and the reservoir attained a steady state the steam generated in the reservoir was introduced into the reactor. The magnesium oxide reacted with the steam and the heat output was generated.

Sprememba teže reaktorja Δm je posledica reakcijskega postopka v reaktorju. To je količina vodne pare, ki reagira, ali se sprosti v reakcijski posodi. Tako je reagirani molski delež x za postopek dehidracije določen kot:

$$x = 1 + \frac{(\Delta m / M_{\text{H}_2\text{O}})}{(m_{\text{Mg(OH)}_2} / M_{\text{Mg(OH)}_2})} \quad (3),$$

kjer je $m_{\text{Mg(OH)}_2}$ količina magnezijevega hidroksida ob polnjenju reaktorja. Dehidracija vzorcev ni potekala do $x=0,0$, temveč do $x=0,2$, zaradi strukturne vode v reaktantu. Fazi dehidracije je sledila faza hidracije. Konec hidracije je bila pri vrednostih reagiranega deleža okoli $x=0,8$. Da smo reaktivnost magnezijevih soli objektivno prikazali, smo določili razliko v reagiranem deležu Δx :

$$\Delta x = x - x_{\text{ini}} \quad (4),$$

kjer je x_{ini} začetni reagiran delež soli v določenem reakcijskem ciklu.

The reactor weight change Δm is due to the reaction process in the reactor. It represents the quantity of water vapour that is reacted or released in the reactor. Thus, the molar reacted fraction x is, for the dehydration process, defined as follows:

$m_{\text{Mg(OH)}_2}$ is the initial charged weight of magnesium hydroxide in the reactor bed. The dehydration of samples did not proceed to $x=0.0$ due to the existence of structural water in the reactant. The reacted fraction at the end of the dehydration process, which is also the starting point for the hydration process, is around $x=0.2$. In order to obtain an objective value for the reactivity of the magnesium salts a molar reacted fraction change Δx is defined:

The x_{ini} is the initial reacted fraction of the reaction cycle.

3 ANALIZA REZULTATOV MERITEV

3 ANALYSIS OF MEASUREMENT RESULTS

3.1 Postopek dehidracije

3.1 Dehydration process

Notranjo temperaturo stene reaktorja T_w smo krmilili z zunanjim električnim grelnikom na nastavljeno temperaturo raven dehidracije T_d . Na sliki 6 so prikazani rezultati meritev temperatur in razlike reagiranega deleža Δx v reaktorju med postopkom dehidracije: pri temperaturi dehidracije 400°C , temperaturi kondenzacije $T_{cd}=20^\circ\text{C}$ ter temperaturi v reakcijski komori $T_{rc}=100^\circ\text{C}$. Tlak reakcije P_d smo s parnim tlakom v rezervoarju vzdrževali pri vrednostih pod 3 kPa.

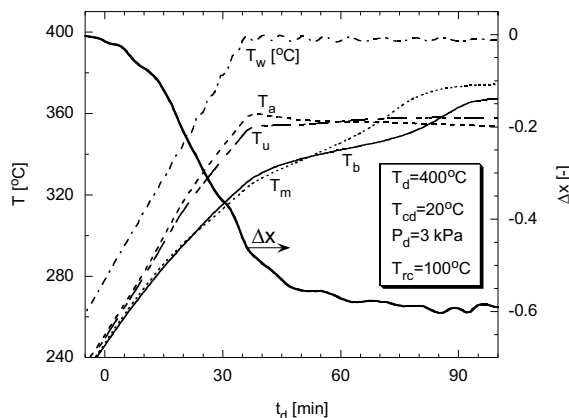
During the dehydration process the inner wall temperature T_w was controlled with the electric heater at the dehydration temperature of T_d . In Figure 6 are the results for the temperatures in the reactor bed and for the difference in the reacted quantity Δx . The measurement conditions were: dehydration temperature T_d of 400°C , condensation temperature T_{cd} of 20°C and inner temperature of reaction chamber $T_{rc}=100^\circ\text{C}$. The reaction pressure P_d was kept below 3 kPa by the vapour pressure in the reservoir.

Temperatura na notranji steni reaktorja T_w se je relativno hitro povečala do vrednosti 400°C . Zaradi nizke toplotne prevodnosti reaktanta se pojavi temperaturna razlika med steno T_w in notranjostjo sredice T_m in T_b . Začetek procesa dehidracije je pri temperaturi 280°C . Po preteku 35 minut od začetka faze je opazno zmanjšanje gradientov temperatur v notranjosti sredice, ker je temperatura stene reaktorja T_w dosegla krmiljeno vrednost. Ko se postopek dehidracije bliža koncu, se toplota ogrevanja porablja bolj ali manj za občuteno gretje reaktorske sredice. Tako sta temperaturi v notranjosti reakcijske sredice proti koncu že višji kakor temperaturi na vrhu reaktorja T_a in T_u , ki nista pod neposrednim vplivom ogrevanja z grelnikom.

The inner wall temperature T_w rose to a T_d of 400°C relatively rapidly. Because of the low thermal conductivity of the reactant, a temperature difference arose between the wall T_w and inner bed T_m and T_b . The dehydration process started at around 280°C . The inner-bed temperature change slowed down after the first 35 minutes because the temperature of the reactor wall T_w reached the controlled value. As the dehydration approached completion the electric heating was greater than the heat consumed for the dehydration. As a result, the inner-bed temperature rose and eventually finally became higher than the upper-bed temperatures T_a and T_u .

Vpliv temperature kondenzacije T_{cd} na reaktivnost pri enaki temperaturi 400°C je predstavljen na sliki 7. Tlak postopka dehidracije P_{cd} ustreza temperaturi kondenzacije T_{cd} . Sprememba reagiranega deleža Δx je hitrejša pri nižjih T_{cd} , zaradi večje tlačne razlike med ravnotežnim tlakom in tlakom kondenzacije. Kljub temu je dolžina faze dehidracije v vseh treh primerih podobna ter zato razlika v reaktivnosti premajhna za praktično uporabo. Višje

The effect of condensation temperature T_{cd} on the reactivity under the same dehydration temperature of 400°C is shown in Figure 7. The dehydration pressure P_{cd} corresponds to the condensation temperature T_{cd} . The Δx change is faster at lower T_{cd} , due to a greater difference between the equilibrium and condensation pressures. However, the duration of the dehydration phase was in all three cases similar and thus the reactivity difference between them is too small to be of



Sl. 6. Eksperimentalni rezultati dehidracije magnezijevega hidroksida pri temperaturi dehidracije reaktorja 400 °C, temperaturi kondenzacije 20 °C

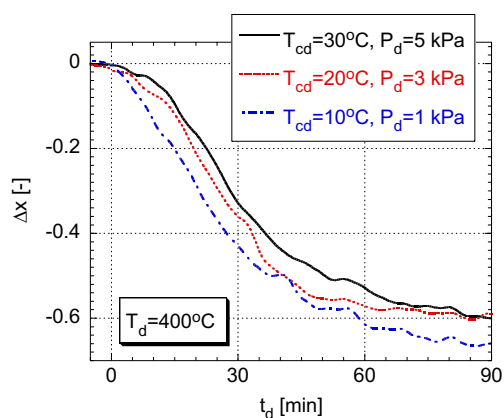
Fig. 6. Experimental result for the magnesium hydroxide dehydration process, dehydration temperature of 400°C, condensation temperature of 20°C

temperature kondenzacije imajo prednost za praktično obratovanje. V primeru temperature kondenzacije okoli 40 do 60 °C bi bilo mogoče kot nizkotemperaturni vir toplote uporabiti tudi sproščeno toploto kondenzacije.

Če pogledamo rezultate meritev pri $T_{cd}=10^\circ\text{C}$, ki je nižja od temperature okolice 20 °C, lahko ugotovimo odstopanje reagiranega deleža od pričakovane vrednosti. Proti koncu postopka dehidracije ($t_d=60$ do 90 min, slika 7) se pojavi odstopanje glede na preostale meritve, zaradi nestabilnih razmer pri kondenzaciji v hranilniku z vodo. Da smo se temu izognili, smo upoštevali le rezultate meritev do 60 minut delovanja.

3.2 Postopek hidracije

Postopek hidracije, katerega rezultati meritev so predstavljeni na sliki 8, je potekal pri temperaturi uparjanja 100 °C, temu ustreznemu tlaku $P_h=101,3$ kPa ter začetni temperaturi reaktorja $T_h=125^\circ\text{C}$. Temperaturo notranje stene reaktorja T_w in notranjo atmosfersko temperaturo T_a smo krmilili na temperaturno raven T_h . V začetku faze hidracije je para hitro prodirala v reaktorsko sredico, zaradi velike tlačne razlike med P_d in P_h . Reakcija poteka hitro, kar je razvidno iz velikih količin reakcijske toplote ter hitrega dviga temperature reaktorja. Ker para, ki je relativno hladnejša kakor reakcijska sredica, vstopa z vrha posode in se med potjo k dnu posode segreva, sta temperaturi v spodnjem in srednjem sloju T_b in T_m višji od temperature v zgornjem sloju reaktorske sredice. Dodaten razlog za razliko v temperaturi je tudi slabša toplotna izoliranost pokrova posode. Če podrobneje pogledamo, lahko opazimo, da najvišjo



Sl. 7. Vpliv tlaka dehidracije na reaktivnost pri temperaturi 400 °C

Fig. 7. Effect of dehydration pressure on the reactivity at 400 °C

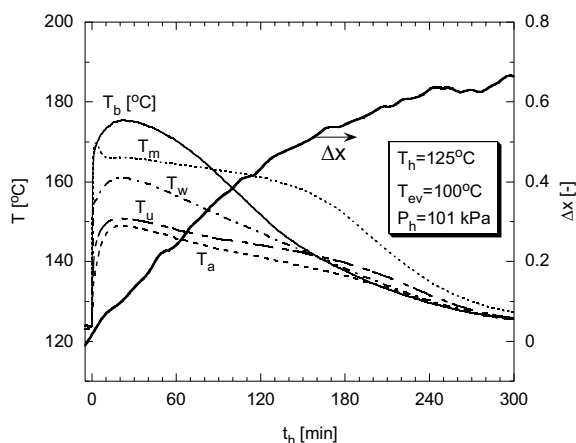
any practical use. A high condensation temperature is better for practical operation. With a condensation temperature of 40–60 °C it could be possible to utilize the heat of condensation as an additional low-temperature heat source.

If we look at the results for $T_{cd}=10^\circ\text{C}$, which is lower than the ambient temperature of 20 °C, a deviation of the reacted fraction from the expected results can be seen. At the end of the dehydration phase ($t_d=60$ –90 min., Figure 7) the deviation from the other measurements occurs as a result of the unstable condensation condition in the water reservoir. To avoid this, we only considered the results obtained during the initial 60 minutes of operation.

3.2 Hydration process

The results of the hydration process are presented in Figure 8. The measurement was taken at the evaporation temperature T_{ev} of 100°C, the corresponding vapour pressure P_h of 101 kPa and an initial reactor-bed temperature T_h of 125°C. The initial temperature of the inner wall of the reactor T_w and the atmospheric temperature in the reactor T_a are controlled at T_h . At the beginning of the hydration phase the vapour diffuses rapidly into the bed due to a large pressure difference between P_d and P_h . The reaction occurs rapidly, which results in a large heat of reaction and a quick rise in the reactor temperature. Because the vapour, which is colder than the bed, enters from the top of the bed and heats up when it is transported by the diffusion to the lower layers, the temperatures T_b and T_m are higher than the temperature of the upper layer T_u . Another reason for the difference in the temperatures is the less effective thermal insulation of the reactor cover.

temperaturo dosežemo najprej v zgornjem sloju. To lahko razložimo z dinamiko reakcijskega postopka v različnih slojih reaktorske sredice [6]. Zaradi dodatnega upora prenosu snovi v navpični smeri sredice, lahko sklepamo, da para najprej v večjih količinah reagira v zgornjih plasteh. Kakor je tudi razvidno s slike 8, se temperatura v spodnji plasti T_b hitreje blizu zunanji temperaturi reaktorja T_h kakor temperaturi v srednji ali zgornji plasti reaktorske sredice. To lahko pripišemo namestitvi termoelementov. S slike 4 je razvidno, da je termoelement v spodnji plasti bližje zunanji steni reaktorja.



Sl. 8. Rezultati meritev postopka hidracije magnezijevega oksida pri temperaturi uparjanja 100 °C in začetni temperaturi reaktorja $T_h = 125$ °C
Fig. 8. Results for a magnesium-oxide hydration process at an evaporation temperature of 100 °C and initial bed temperature of 125 °C

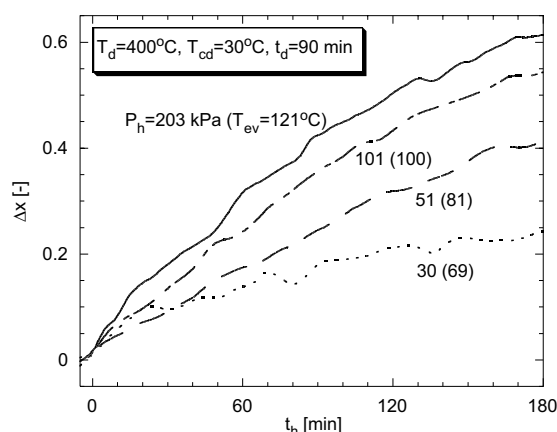
Vpliv tlaka hidracije na reaktivnost v enakih razmerah hidracije je predstavljen na sliki 9. Kakor lahko vidimo, je z višjim tlakom hidracije gradient spremembe reagiranega deleža Δx večji. To pomeni, da se postopek hidracije pri višjih tlakih odvija hitreje. Podobno kakor prej je pri višjem tlaku razlika med ravnotežnim in tlakom vodne pare večja, kar vpliva na hitrost reakcije.

Temperaturo v srednjem sloju T_m lahko vzamemo kot reprezentativno za celotni reaktor, zato jo bomo označili s T_h . Na sliki 10 je predstavljena odvisnost povprečne temperature reaktorske sredice T_h od tlaka hidracije P_h . Opazimo, da je z višjim tlakom temperatura v notranjosti reaktorja višja.

Pri tlaku 203 kPa smo dobili toploto na temperaturni ravni 190 °C. To toploto lahko npr. uporabimo za pogon absorpcijskega hladilnika z dvojnim učinkom. Pri nižjem tlaku 30 kPa pa smo dobili toploto pri 100 °C, ki jo lahko uporabimo kot vir toplote za sistem daljinskega ogrevanja.

Temperaturni dvig, razlika med temperaturo hidracije in temperaturo uparjanja, znaša med 40 in 70 K ter dosega vrednosti preostalih toplotnih črpalk.

A closer look reveals that the maximum temperature is reached in the upper layer first. This can be explained by the reaction process dynamics in the different layers of the reactor bed [6]. Due to the additional mass-transfer resistance in the vertical direction we can assume that the vapour reacts in larger quantities in the upper layers first. Figure 8 shows that the temperature of the bottom layer T_b tends to increase more quickly than the temperature of the middle layer T_m to the external temperature of the reactor T_{rc} . This is mainly because the position of the thermocouple in the bottom layer is closer to the reactor wall than the other two thermocouples (T_m , T_u , Figure 4).



Sl. 9. Vpliv tlaka hidracije na reaktivnost v enakih razmerah hidracije
Fig. 9. Effect of hydration pressure on the reactivity under the same dehydration condition

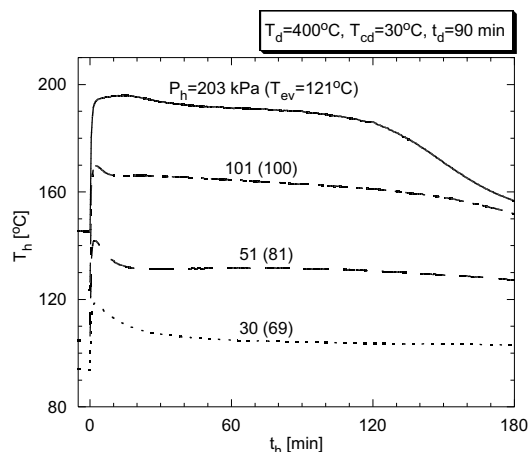
Fig. 9. Effect of hydration pressure on the reactivity under the same dehydration condition

The effect of the hydration pressure on the reactivity under the same dehydration condition is shown in Figure 9. It is clear that a higher hydration pressure represents a higher reacted fraction change Δx , which means that the reaction process occurs more quickly at higher pressures. Like before, at higher pressures the difference between the equilibrium and hydration pressure is greater, which has an influence on the reactivity.

The temperature in the middle layer T_m could be taken as a representative temperature for the whole reactor. In Figure 10 the dependency of the representative bed temperature on the hydration pressure is shown. A higher temperature of the reactor bed is attained at a higher pressure.

We can see that at a pressure of 203 kPa heat at over 190 °C is generated. This heat flow can be used, for example, as a driving heat source for a double-effect absorption chiller. At a lower pressure of 30 kPa a heat output at 100 °C is produced. In this case the heat output could be the source for a district-heating system.

The temperature rise, the difference between the temperature of hydration and the temperature of evaporation, amounts to 40–70 K, which is similar to



Sl. 10. Vpliv tlaka hidracije na temperaturo, ki smo jo merili v srednjem sloju sredice

Fig. 10. Effect of hydration pressure on hydration temperature, measured in the middle part of the reactor bed

Razvidno je, da lahko s postopkom hidracije pridobivamo toploto v širokem temperaturnem razponu s spreminjanjem tlaka v uparjalniku kemične toplotne črpalke. To lahko dosežemo s spreminjanjem temperaturni ravni vira toplote za uparjalnik, za kar lahko še dodatno izkoristimo toploto izpušnih plinov.

3.3 Učinkovitost reaktorske sredice

Učinkovitost toplotne črpalke kot hranilnika toplote, ki temelji na meritvah reaktorske sredice, smo ocenili z določitvijo povprečne specifične toplotne moči reaktorja w_{mean} . Najprej smo določili toploto iz reaktorja na enoto teže $Mg(OH)_2$, ki smo ga na začetku vstavili v reaktor q . Ta je določena z enačbo:

$$q = (\Delta H_1^\circ / M) \int_0^{t_h} x dt_h \quad (5)$$

Povprečna specifična toplotna moč reaktorja w_{mean} je določena kot:

$$w_{mean} = \frac{q}{t_h} \quad (6)$$

Časovna odvisnost q in w_{mean} pri različnih tlakih hidracije je predstavljena na sliki 11. Za prvih 60 minut smo pri tlaku 203 kPa določili povprečno specifično toplotno moč reaktorja $w_{mean} = 119$ W/kg ter skupno $q = 430$ kJ/kg toplote. Če bi shranili toploto v obliki občutene toplote med 70 °C in 90 °C v vodnem hranilniku toplote, bi znašala specifična toplotna moč $q_{H_2O} = 83$ kJ/kg (črtkana črta na sliki 11). Kakor je razvidno, je gostota shranjevanja energije kemične toplotne črpalke z magnezijevim oksidom okoli 5-krat večja od običajnega vodnega hranilnika toplote, če bi trajanje postopka hidracije omejili na 60 minut. Poleg tega je tudi temperaturna raven toplote iz kemične toplotne črpalke okoli 170 °C do 200 °C, kar je tudi do dvakrat višje od običajnih vodnih hranilnikov. Prednost kemične toplotne črpalke je tudi možnost shranjevanja toplote za daljše obdobje v obliki ločenih

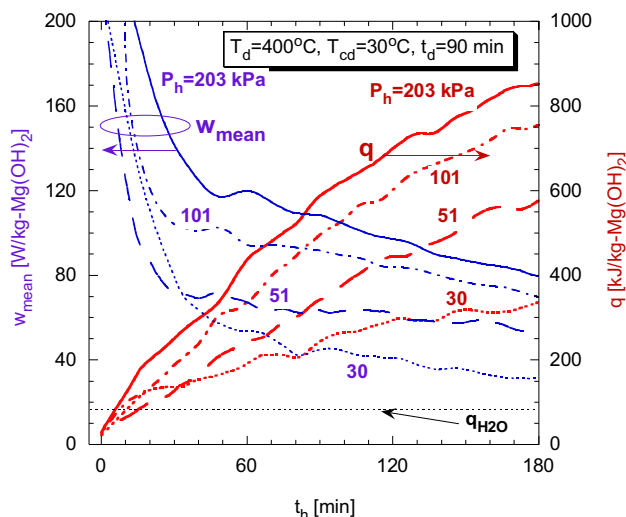
other heat pumps. It is clear that the heat that is rejected from the hydration process could be generated over a wide range of temperatures simply by varying the pressure in the evaporator of the chemical heat pump. This can be achieved by varying the heat-source temperature of the evaporator, where heat from the exhaust gases could also be used.

3.3 Thermal performance of the reactor bed

The thermal performance of the heat pump as a heat store, which is based on measurements of the reactor bed, was evaluated to determine the reactor's mean heat-output rate w_{mean} . First, the heat-output from the reactor per unit weight of initially charged $Mg(OH)_2$ q is determined. It is defined as:

The mean heat output rate w_{mean} is expressed as:

The result of changing q and w_{mean} during the operation and for different hydration pressures is shown in Figure 11. At a pressure of 203 kPa, a mean heat-output rate of $w_{mean} = 119$ W/kg and a gross heat output of $q = 430$ kJ/kg are calculated for the initial 60 minutes. When the heat is stored in a conventional, sensible heat water-storage system between 70°C and 90°C, the heat output q_{H_2O} amounts to about 83 kJ/kg (dashed line in Figure 11). This means that the heat-storage density of the measured chemical heat storage is about five times that of the water-storage system if the hydration process is limited to 60 minutes. The output temperature of the chemical heat pump is around 170–200 °C, which is more than twice as high as standard water-storage systems. The chemical heat pump can also store heat for a longer period in the form of separated reactants: magnesium oxide and



Sl. 11. Toplotna učinkovitost postopka hidracije v kemični toplotni črpalki
Fig. 11. Hydration performance of the chemical heat pump

reaktantov, magnezijevega oksida in vode. Poleg tega lahko toploto dobavljamo na različnih temperaturnih ravneh, odvisno od tlaka uparjanja.

V primeru uporabe naprave za pridobivanje hladilne toplote, kar bi kogeneracijski sistem dogradilo v trigeneracijski sistem, bi bilo treba napravo izvesti z dvema reaktorjema, v katerih bi potekala nasprotni reakciji ([17] in [22]). Poleg tega bi morali obe reakciji trajati približno enako dolgo, da bi lahko sistem deloval čim učinkoviteje ter omogočal toploto shranjevati in uporabljati ves čas delovanja. V našem primeru bi bilo treba postopek hidracije dodatno pospešiti, kar lahko dosežemo s spremembo v izvedbi reaktorske sredice.

4 SKLEP

V tem delu je eksperimentalno preverjena izvedljivost toplotno gnane kemične toplotne črpalke. S toplotno črpalko smo želeli povečati možnosti za izkoriščanje odvečne toplote iz kogeneracijskih postrojenj. Pričakujemo, da se bodo kemične toplotne črpalke uporabljale za izravnavanje obremenitev običajnih kogeneracijskih sistemov, ker pokrivajo temperaturno področje dimnih plinov kogeneracijskega postrojenja. Odvečna toplota bo v času manjše porabe grelne toplote shranjena pri temperaturi 300 °C do 400 °C. V času koničnih obremenitev, bi toploto hidracije po potrebi sprostil pri temperaturi okoli 150 °C do 200 °C.

Iz izmerkov smo ugotovili, da lahko pri tlaku uparjanja 203 kPa s postopkom hidracije pridobivamo toploto pri temperaturi okoli 190 °C. V primeru višjih tlakov bi lahko dosegli še višje temperaturne ravni, vendar samo pod pogojem, da imamo na voljo dodaten toplotni vir za uparjanje vode.

Kakor je razvidno iz rezultatov, traja faza hidracije vsaj dvakrat dalj kakor faza dehidracije. Če želimo kemični hranilnik toplote praktično uporabiti,

water. In addition, this heat can be supplied at various temperatures, depending on the evaporation pressure.

When using the device for continuous cold production, which would upgrade the cogeneration system to a trigeneration system, the device should have two reactors, which would operate with opposite reactions ([17] and [22]). In addition, the duration of both reactions should be similar, so that the cold can be produced more effectively over the whole operating time. In our case the hydration phase should be additionally intensified, which could be done with a change to the reactor bed.

4 CONCLUSION

In this paper the operation of a thermally driven heat pump is demonstrated experimentally. The heat pump is expected to make better use of the surplus heat that is generated in the cogeneration system. The proposed chemical heat pump is expected to act as a heat-storage system to even out the load of a common cogeneration system because it can cover the temperature range of exhaust gases from the cogeneration engines. The surplus heat, which is generated during the period of low heat demand, would be stored at 300 °C to 400 °C, whereas the heat from the hydration process would be released during the peak-load periods at a temperature of about 150–200 °C.

At a hydration pressure of 203 kPa a heat output above 190 °C is measured experimentally. In the case of higher pressures, higher temperature levels would be achieved, but only if an additional heat source is available for the evaporation process.

As we can see from the results, the hydration process is at least twice as long as the decomposition process. Therefore, to make practical use of the chemical heat storage, the dynamics of the heat storage and heat utilisation have to be better optimised. A proper

je treba dinamiko shranjevanja in sproščanja toplote optimirati. S pravilno izvedbo sredice, kar je izhodišče za nadaljnje raziskave, je mogoče oba postopka v napravi uravnovesiti ter tako upravičiti namembnost naprave.

Po okvirni primerjavi z običajnim vodnim hranilnikom toplote smo ugotovili okoli 5-krat večjo gostoto shranjevanja energije, višje temperaturne ravni razpoložljivih toplot ter možnost shranjevanja toplote brez izgub na daljši časovni rok. Zaradi teh prednosti pred običajnimi sistemi je uporaba kemičnih reakcij v hranilnikih toplote več ko primerna.

Pri preračunu nismo upoštevali zmanjšanja gostote shranjevanja energije zaradi vpliva dodatnih mas, npr. mase prenosnika toplote, ki ne sodelujejo aktivno pri postopku shranjevanja toplote. To je odlično izhodišče za nadaljevanje raziskav v smeri izboljšanja prenosnih površin v reaktorjih kemičnih toplotnih črpalk z namenom povečanja gostote shranjevanja energije.

Priznanje

Raziskave je finančno podprlo Japonsko društvo za promocijo znanosti - JSPS. Avtorji se zahvaljujejo tudi podpori podjetja DMW, Japonska.

realisation of the reactor bed represents a starting-point for further research work. In this way both processes could be better balanced and research on the use of a chemical heat pump as a storage system would be justified.

In comparison with a classical water heat-storage system the improvement in the energy density is about a factor of five. In addition, higher temperatures could be reached with a chemical heat-storage system. The most interesting advantage is the possibility of on-demand heat utilisation, without any heat losses to the environment. Because of this advantage over classical systems the chemical reactions are more appropriate for use in heat storage systems.

In the calculation process the reduction in the energy density due to the influence of the additional mass, i.e. the mass of the heat exchanger, which does not play an active part in the heat storage process, is not included. This represents an excellent starting-point for the continuation of research in the direction of improving heat-exchange areas, which are used in the reactors of chemical heat pumps, with the intention of an increase in the heat-storage energy density.

Acknowledgement

The research was funded by the grant-in-aid for scientific research of the Japan Society for the Promotion of Science. The authors also thank the DMW Corporation, Japan for the research support.

5 OZNAKE 5 NOMENCLATURE

specifična toplota	C	kJ/kmolK	specific heat
standardna reakcijska toplota	ΔH^0	kJ/kmol	standard heat of reaction
začetna teža magnezijevega hidroksida	L_i	kg	initial weight of loaded magnesium hydroxide
molska masa magnezijevega hidroksida	M	kg/kmol	molecular mass of magnesium hydroxide
začetna teža	m	kg	initial charged material weight
tlak reakcije	P	kPa	reaction pressure
sproščena toplota med hidracijo	q	kJ/kg	hydration heat output
občutena toplota vode	q_{H_2O}	kJ/kg	sensible heat output of water
temperatura	T	°C	temperature
čas reakcije	t	s	reaction time
srednja specifična moč hidrationske toplote	w_{mean}	W/kg	mean heat output rate during a hydration process
reagiran molski delež	x	-	mole reacted fraction
sprememba reagiranega molskega deleža	Δx	-	mole reacted fraction change amount

Indeksi:

reakcija magnezijev oksid/voda	1
fazna sprememba vode, kapljevina/plin	2
prazen prostor v reaktorju	a
spodnji del reaktorske sredice	b
kondenzacija	cd
dehidracija $Mg(OH)_2$	d
uparjanje	ev
plin	g

Subscripts:

magnesium oxide and water reaction system
water liquid/gas phase change
in-bed atmosphere
the bottom part of the bed
condensation
dehydration of $Mg(OH)_2$
evaporation
gas

voda	H ₂ O	water
hidracija MgO	h	hydration of MgO
ogrevanje	he	heating
začetno stanje reakcijskega cikla	ini	the initial state of the reaction cycle
magnezijev hidroksid	Mg(OH) ₂	magnesium hydroxide
srednji del reaktorske sredice	m	middle part of the bed
notranjost reaktorske komore	rc	inner reaction chamber
zgornji del reaktorske sredice	u	upper part of the bed
notranja stena reaktorja	w	inner wall of the reactor

6 LITERATURA

6 REFERENCES

- [1] Hartman, M., O. Trnka, K. Svoboda, J. Kocurek (1994) Decomposition kinetics of alkaline-earth hydroxides and surface area of their calcines, *Chemical Engineering Science*, Vol.49, No.8, 1209-1216.
- [2] Fujii, I., K. Tsuchiya, M. Higano, J. Yamada (1985) Studies of an energy storage system by use of the reversible chemical reaction: $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca(OH)}_2$, *Solar Energy*, Vol.34, No.4/5, 367-377.
- [3] Fujii, I., M. Ishino, S. Akiyama, M. S. Murthy, K. S. Rajanandam (1994) Behavior of $\text{Ca(OH)}_2/\text{CaO}$ pellet under dehydration and hydration, *Solar Energy*, Vol.53, No.4, 329-341.
- [4] Kanamori, M., H. Matsuda, H. Hasatani (1996) Heat storing/releasing characteristics of a chemical heat storage unit of electricity using a $\text{Ca(OH)}_2/\text{CaO}$ reaction, *Heat Transfer - Japanese Research*, Vol.25, No.6, 400-409, ISSN 0096-0802.
- [5] Ogura, H., R. Shimojyo, H. Kage, Y. Matsuno, A. S. Mujumdar (1999) Simulation of hydration/dehydration of $\text{CaO}/\text{Ca(OH)}_2$ chemical heat pump reactor for cold/hot heat generation, *Drying Technology*, Vol.17, No.7, 1579-1592, ISSN 0737-3937.
- [6] Cerkvėnik, B. (1998) Raziskave toplotnega kompresorja za hlajenje, *Magistrsko delo (Master's Thesis)*, University of Ljubljana, Faculty of Mechanical Engineering, Slovenia.
- [7] Cerkvėnik, B., P. Satzger, F. Ziegler, A. Poredoš (1999) High efficient cycles using $\text{CaO}/\text{H}_2\text{O}$ and $\text{LiBr}/\text{H}_2\text{O}$ for gas cooling, Proceedings, *6th ASME Conference on Renewable and Advanced Energy Systems for the 21st century*, Maui, Hawaii.
- [8] Cerkvėnik, B., A. Poredoš, F. Ziegler (2000) Improvement of topping cycle efficiency with increase in evaporation pressure level, *Strojniški Vestnik*, Vol. 46, No. 10, 671-682.
- [9] Kato, Y., Yamashita N., Yoshizawa Y. (1993) Study of chemical heat pump with reaction system of magnesium oxide/water, *Kagaku Kogaku Ronbunshu* 19, 1213-1216, ISSN 0386-216X (in Japanese).
- [10] Kato, Y., J. Nakahata, Y. Yoshizawa (1999) Durability characteristics of the hydration of magnesium oxide under repetitive reaction, *J. of Materials Science*, Vol.34, 475-780, ISSN 0022-2461.
- [11] Kato, Y., K. Kobayashi, Y. Yoshizawa (1998) Durability to repetitive reaction of magnesium oxide/water reaction system for a heat pump, *Applied Therm. Eng.*, Vol.18, 85-92, ISSN 1359-4311.
- [12] Kato, Y., S. Inoue, W. Nanmoku, Y. Yoshizawa (1995) Kinetic study of the hydration of magnesium oxide/water chemical heat pump, Proceedings, *30th Intersociety Energy Conversion*, Vol. 3, 17-22, Orlando, USA.
- [13] Kato, Y., F. Takahashi, W. Nanmoku, Y. Yoshizawa (1998) Heat output performance study of magnesium oxide/water chemical heat pump, *Kagaku Kogaku Ronbunshu* 24, 840-844, ISSN 0386-216X (in Japanese).
- [14] Fisher, S., M. Schreiner, T. Rettelbach, W. Schölkopf (1996) Thermochemische Speicherung und Wärmetransformation von Fernwärme zum Lastausgleich in einem Fernwärmenetz, *Project report*, ZAE Bayern, Munich, Germany.
- [15] Oertel, K., M. Fischer (1998) Adsorption cooling system for cold storage using methanol/silicagel, *Applied Thermal Engineering*, Vol.18, 773-786.
- [16] Berlitz, T., N. Lemke, P. Satzger, F. Ziegler (1996) Absorption chiller with integrated cold storage, Proceedings, *International Absorption Heat Pump Conference*, Montreal.
- [17] Cerkvėnik, B. (2001) Use of square-root criterion for increase in efficiency of sorption cooling devices, *doktorsko delo (Doctoral Thesis)*, University of Ljubljana, Faculty of Mechanical Engineering, Slovenia.
- [18] Wu, S., I. A. Eames (1999) Efficient use of waste heat from combined heat and power systems, Proceedings, *International Ab-sorption Heat Pump Conference*, Munich, Germany.
- [19] Kunugi, Y., Y. Ikumi, N. Sawada, S. Fujimaki, M. Fujita, D. K. Hwang, Y. T. Kang, T. Kashiwagi (1999) Advanced absorption cycles for waste heat of fuel driven power generation refrigeration and energy storage system, Proceedings, *International Absorption Heat Pump Conference*, Munich, Germany.

- [20] Bhatti, A. S., D. Dollimore (1984) The rates of hydration of sea water magnesias, *Surface Technology* 22, 181-188, ISSN 0376-4583.
- [21] Ervin, G. (1977) Solar heat storage using chemical reactions, *J. Solid State Chem.*, Vol.22, 51-61, ISSN 0022-4596.
- [22] Cerkvėnik, B., D. Stitou, F. Storkenmaier, F. Ziegler (2001): Measurement results for the novel NH₃ - NiCl₂(NH₃)_{2/6} reaction cooling device, *Proceedings, 2nd Int. Heat Powered Cycles Conference*, Volume 2, Paris, France.

Naslova avtorjev: doc.dr. Yukitaka Kato
prof.dr. Yoshio Yoshizawa
Research Laboratory for Nuclear
Reactors
Tokyo Institute of Technology
O-okayama, Meguro-ku
Tokyo 152-8550, Japonska
yukitaka@nr.titech.ac.jp

dr. Boštjan Cerkvėnik
Univerza v Ljubljani
Fakulteta za strojništvo
Aškerčeva 6
1000 Ljubljana
bostjan.cerkvenik@fs.uni-lj.si

mag. Atsushi Minakami
NSK Ltd.
1-5-50, Kugenuma Shinmei
Fujisawa-shi 251-8501, Japonska

Authors' Addresses: Doc.Dr. Yukitaka Kato
Prof.Dr. Yoshio Yoshizawa
Research Laboratory for
Nuclear Reactors
Tokyo Institute of Technology
O-okayama, Meguro-ku
Tokyo 152-8550, Japan
yukitaka@nr.titech.ac.jp

Dr. Boštjan Cerkvėnik
University of Ljubljana
Faculty of Mechanical Eng.
Aškerčeva 6
1000 Ljubljana, Slovenia
bostjan.cerkvenik@fs.uni-lj.si

mag. Atsushi Minakami
NSK Ltd.
1-5-50, Kugenuma Shinmei
Fujisawa-shi 251-8501, Japan

Prejeto: 3.12.2001
Received:

Sprejeto: 23.5.2002
Accepted:

Računsko reševanje inverznega problema oblikovanja nadzvočne šobe

A Numerical Solution to the Inverse Problem of Supersonic-Nozzle Design

Vinko Martinis - Branimir Matijašević - Željko Tuković

Računsko oblikovanje nadzvočne šobe je občutljivo glede stabilnosti v področju nadzvočnega toka. Računski model, predstavljen v tem prispevku, se izogiba tej nestabilnosti z uvajanjem analitično določene porazdelitve tlaka na osi osnosimetrične nadzvočne šobe. Parametri toka v inverzno oblikovani šobi so preverjeni s programom FLUENT in prikazujejo enakomerno porazdelitev po prečnih prerezi vzdolž šobe.

© 2002 Strojniški vestnik. Vse pravice pridržane.

(Ključne besede: šobe nadzvočne, oblikovanje šob, modeli računski, problemi inverzni)

The numerical design of a nozzle is sensitive to stability in the region of supersonic flow. In the numerical algorithm presented in this paper the instability is avoided by the introduction of an analytically set pressure distribution on the axis of the axisymmetrical supersonic nozzle. The flow parameters of the inverse designed nozzle are checked by the application code FLUENT and they show a regular distribution on cross-sections along the nozzle.

© 2002 Journal of Mechanical Engineering. All rights reserved.

(Keywords: supersonic nozzle, nozzle design, numerical solutions, inverse problems)

0 UVOD

Računski postopek oblikovanja nadzvočne šobe je še posebej občutljiv glede stabilnosti v področju nadzvočnega toka ([1] do [5]). Čeprav je uporaba računskih metod pogosta v praksi, le redko najdemo ustrezeni algoritem v obliki uporabniškega programa za rešitev inverznega problema prenosa toplote in snovi. Problem je inverzen, ker je področje neznano [6].

V rešitvi, prikazani v tem prispevku, je v primeru osnosimetrične šobe določena izvirna analitična porazdelitev tlaka na osi simetrije. Izračun oblike šobe in parametrov toka je izveden po koraknem postopku po [7]. Začetni pogoj je izpeljan posebej. Parametri toka, v tako oblikovani šobi, so preverjeni z uporabo programa FLUENT. Dobljeni rezultati se dobro ujemajo.

1 OPIS MATEMATIČNEGA MODELA

Poleg kontinuitetnih, gibalnih in energijskih enačb, ki opisujejo tok v šobi, uvedemo funkcijo toka $\bar{\Psi}$ z izrazom:

$$\vec{w} \cdot \nabla \bar{\Psi} = 0$$

0 INTRODUCTION

The numerical algorithm of supersonic-nozzle design is particularly sensitive to stability in the region of supersonic flow ([1] to [5]). Although the application of numerical methods is very common in practice it is very rarely possible to find an appropriate application code for the solution of the inverse heat- and mass-transfer problems. The problem is inverse because the domain is unknown [6].

In the solution presented in this paper, for the case of an axis-symmetrical nozzle, the original analytic pressure distribution on the axes of symmetry is defined. The numerical calculation of the nozzle form and the flow parameters were performed with the marching algorithm according to [7]. The initial condition was derived separately. The flow parameters in the nozzle designed in this way were checked for closed domain with the application code FLUENT and the results obtained correspond very well.

1 DESCRIPTION OF THE MATHEMATICAL MODEL

In addition to equations of continuity, motion and energy, which describe the flow in the nozzle, the stream function $\bar{\Psi}$ is introduced with the expression:

oziroma v valjnih koordinatah za osnosimetrični primer:

i.e. in cylindrical coordinates for the axisymmetrical case:

$$\bar{u} \frac{\partial \bar{\Psi}}{\partial \bar{x}} + \bar{v} \frac{\partial \bar{\Psi}}{\partial \bar{r}} = 0$$

kjer so: $\bar{x}$ – koordinata na osi simetrije; $\bar{r}$ – radialna koordinata pravokotna na os simetrije, $\bar{u}$, $\bar{v}$ – projekcije hitrosti $\bar{w}$ na osi $\bar{x}$ in $\bar{r}$. Sedaj enačbe toka prikažemo preprosto:

where: $\bar{x}$ is the coordinate in the axis of symmetry; $\bar{r}$ is the radial coordinate perpendicular to the axis of symmetry; $\bar{u}$, $\bar{v}$ are the projections of velocity $\bar{w}$ on the axes $\bar{x}$ and $\bar{r}$. Now the flow equations are expressed in the simple manner:

$$\frac{\partial \bar{p}}{\partial \bar{\Psi}} = -\frac{\gamma}{\bar{r}} \frac{\partial \bar{v}}{\partial \bar{x}} \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{r}^2}{\partial \bar{\Psi}} = \frac{2}{\bar{\rho} \bar{u}} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \bar{r}}{\partial \bar{x}} = -\frac{\bar{v}}{\bar{u}} \quad (3)$$

$$\bar{p} = \bar{\rho}^\gamma \quad (4)$$

$$\bar{u} = \left[\frac{\kappa+1}{\kappa-1} - \frac{2}{\kappa-1} \bar{p}^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - \bar{v}^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5),$$

kjer so: $\kappa = c_p/c_v$ – konstantni eksponent izentrope (za zrak $\kappa = 1.4$); c_p , c_v – specifična toplota pri konstantnem tlaku oz. prostornini; $\bar{\rho}$, $\bar{p}$ – gostota oz. tlak snovi v šobi.

where: $\kappa = c_p/c_v$ is the constant isentropic exponent (for air $\kappa = 1.4$); c_p , c_v are the specific heat at constant pressure i.e. at constant volume; $\bar{\rho}$, $\bar{p}$ is the fluid density i.e. the pressure in the nozzle.

Geometrijske količine in hitrosti so normirane:

The geometrical quantities and velocities are normalised:

$$r = \frac{\bar{r}}{r_*} ; \quad x = \frac{\bar{x}}{r_*} \quad (6)$$

$$u = \frac{\bar{u}}{a_*} ; \quad v = \frac{\bar{v}}{a_*} \quad (7),$$

kjer so s črto zgoraj označene dejanske količine; $a_* = (\kappa p_*/\rho_*)^{1/2}$ – kritična hitrost širjenja nizkotlačnih motenj; p_* , ρ_* – vrednosti tlaka in gostote v kritični točki. Normirana funkcija toka je:

where the overbar denotes the real quantities; $a_* = (\kappa p_*/\rho_*)^{1/2}$ is the critical propagation velocity of the low-pressure disturbance; p_* and ρ_* are the values of pressure and density at the critical position. The normalised stream function is:

$$\Psi = \frac{\bar{\Psi}}{\rho_* a_* r_*^2}. \quad (8)$$

Normiranje prostorninskih koordinat s kritičnim r_* ni nujno. V tem primeru je mogoče spremeniti merilo za posamezne količine.

Normalising of the space coordinates with critical r_* is not necessary. In this case it is possible to change the measure for particular quantities.

2 ALGORITEM REŠEVANJA

2 ALGORITHM OF THE SOLUTION

Koračni algoritem. Za rešitev gornjega sistema enačb za vsak Ψ ($\Psi = \Psi_j$) je treba določiti neznanke r , p , ρ , u in v (kot brezdimenzijske količine) za vsak x od vstopa do izstopa iz šobe. Področje je odprto v smeri pravokotno na os simetrije, problem je hiperboličen. Očitno je, da je za koračni postopek treba določiti začetne pogoje. Na osi simetrije je $\Psi_0 = 0$, kar ne moremo upoštevati kot začetni pogoj, ki ga bomo določili kasneje.

Če so vrednosti neznanek v vozlih pri $\Psi = \Psi_j$ določene, lahko določimo njihove vrednosti pri

Marching algorithm. For the solution of the above system of equations for every Ψ ($\Psi = \Psi_j$) it is necessary to determine the unknowns r , p , ρ , u and v (as dimensionless quantities) for every x from the nozzle input to the nozzle output. The domain is open in the direction perpendicular to the axis of symmetry, and the problem is hyperbolic. It is evident that for the marching algorithm the initial conditions have to be set. On the axis of symmetry $\Psi_0 = 0$, which cannot be taken as an initial condition, and will be determined below.

If the values of the unknowns in nodes where $\Psi = \Psi_j$ have already been determined then their val-

$\Psi = \Psi_{j+1}$ prek diskretiziranih enačb drugega reda natančnosti.

1. Z diskretizacijo enačbe (2) dobimo:

$$r_{i,j+1}^{[l]} = \left\{ r_{i,j}^2 + \left[\left(\frac{1}{\rho u} \right)_{i,j} + \left(\frac{1}{\rho u} \right)_{i,j+1}^{[l-1]} \right] \Delta \Psi \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (9),$$

kjer sta: $x = i \Delta x$, $[l]$ - številka iteracije.

2. Z diskretizacijo enačbe (1) dobimo:

$$p_{i,j+1}^{[l]} = p_{i,j} - \frac{1}{2} \gamma \left[\left(\frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial x} \right)_{i,j} + \left(\frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial x} \right)_{i,j+1}^{[l-1]} \right] \Delta \Psi \quad (10).$$

3. Z diskretizacijo enačbe (5) dobimo:

$$v_{i,j+1}^{[l]} = \left[\frac{\frac{\partial r}{\partial x}}{\sqrt{1 + \left(\frac{\partial r}{\partial x} \right)^2}} \left(\frac{\kappa + 1}{\kappa - 1} - \frac{2}{\kappa - 1} p^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}} \right)^{\frac{1}{2}} \right]^{[l]} \quad (11).$$

4. Z diskretizacijo enačbe (4) dobimo:

$$\rho_{i,j+1}^{[l]} = \left(p^{\frac{1}{\gamma}} \right)_{i,j+1}^{[l]} \quad (12).$$

5. Nazadnje je:

$$u_{i,j+1}^{[l]} = \left[\frac{\kappa + 1}{\kappa - 1} - \frac{2}{\kappa - 1} p^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}} - v^2 \right]_{i,j+1}^{[l]} \quad (13).$$

Algoritem je koračen po koordinati Ψ , vsak $\Psi = \Psi_j$ lahko uporabimo kot obliko kanala šobe. Iterativni postopek je potreben, ker so količine na desni strani z indeksom $i, j+1$ neznane.

Začetni pogoji. Stabilnost rešitve dobimo z izvorno analitično določeno enačbo spremembe tlaka na osi šobe ($\Psi = 0$):

$$p(x, 0) = a \tanh(-bx) + c; \quad -2 \leq x \leq 3 \quad (14),$$

kjer so:

where:

$$p = \frac{\bar{p}}{p_*}$$

$$a = \frac{1}{2} (p_{in} - p_{out})$$

$$c = \frac{1}{2} (p_{in} + p_{out})$$

Iz

From

$$p = \left(\frac{\kappa + 1}{2 + (\kappa - 1) Ma^2} \right)^{\kappa / \kappa - 1} \quad (15)$$

za mejne pogoje $Ma_{in} = 0,1$ in $Ma_{out} = 2,1$ dobimo:

for boundary conditions $Ma_{in} = 0.1$ and $Ma_{out} = 2.1$ are obtained:

$$\begin{aligned} p_{in} &= 1,880 \\ p_{out} &= 0,207 \end{aligned} \quad (16).$$

Strmina krivulje za $x = 0$ preko koeficienta $b > 0$ lahko izberemo poljubno. Priporočeno je, da vzamemo $b < 4$. Pri manjšem b je sprememba tlaka v šobi počasnejša. V prejšnjih enačbah indeksi *in* in *out* označujejo vhodni oz. izhodni prerez šobe.

The slope of the curve for $x = 0$ over coefficient $b > 0$ can be chosen arbitrarily. It is recommended that $b < 4$ is taken. For smaller b the pressure change in the nozzle is slower. In the previous equations the subscripts *in* and *out* denote the input, i.e. the output section of the nozzle.

Določenih pogojev $p(x,0)$ na osi simetrije ne moremo neposredno upoštevati kot začetne pogoje. Vrednost neznanek vzdolž tokovnice $\Psi = \Psi_1$ izračunamo s povprečenjem njihovega razvoja v red oblike:

$$f(x, \Psi) = \sum_{n=0}^N f_n(x) \Psi^n + \sqrt{\Psi} \sum_{n=0}^N f'_n(x) \Psi^n \quad (17),$$

kjer je $f(x, \Psi_1) = r, p, v, \rho$ in n na $\Psi = \Psi_1$, ki je blizu osi simetrije.

Posamezno odvisnost spremenljivke za osnosimetrično šobo dobimo:

a) Iz enačbe (2) izhaja:

$$\rho u r \frac{\partial r}{\partial \Psi} = 1 \quad (18).$$

Za spremenljivke ρ, u, r vzamemo red $f(\rho), f(u), f(r)$:

$$\frac{\partial r}{\partial \Psi} = \sum_{n=0}^N n r_n(x) \Psi^{n-1} + \frac{1}{2\sqrt{\Psi}} \sum_{n=0}^N r_n^1(0) \Psi^{n-1} + \sqrt{\Psi} \sum_{n=0}^N n r_n^1 \Psi^{n-1} \quad (19).$$

Po množenju se izenačijo koeficienti z enakimi eksponenti spremenljivke Ψ na levi strani s svojimi dvojniki na desni strani. Dobimo r_n in r_n^1 .

b) Iz enačbe (1) dobimo koeficienta p_n in p_n^1 na podoben način.

c) Iz enačbe (3) izhaja:

$$v = u \frac{\partial r}{\partial x} \quad (20),$$

od koder določimo koeficienta v_n in v_n^1 .

d) Iz enačbe (4) določimo ρ_n in ρ_n^1 .

e) Nazadnje iz enačbe (5) izhaja:

$$\rho u \frac{\partial u}{\partial \Psi} + \rho v \frac{\partial v}{\partial \Psi} = -\frac{1}{\gamma} \frac{\partial p}{\partial \Psi}$$

Na osi simetrije je $\Psi=0, v=0, v_0=0$. Iz enačbe (4) $\rho_0 = p_0^{1/\kappa}$ in iz enačbe (5) izhaja:

The set conditions $p(x,0)$ on the axis of symmetry $p(x,0)$ cannot be used directly as initial conditions. The values of the unknowns on the stream line $\Psi = \Psi_1$ are calculated by means of their development in series of the form:

where $f(x, \Psi_1) = r, p, v, \rho$ and n on $\Psi = \Psi_1$, which is close to the axis of symmetry.

The single dependence of the variable for the axisymmetrical nozzle is obtained as follows.

a) From equation (2):

For variables ρ, u, r the order $f(\rho), f(u), f(r)$ is taken:

After multiplication, the coefficients with equal exponents of variable Ψ on the left-hand side are equalised with their counterparts on the right-hand side, and r_n and r_n^1 are obtained.

b) The coefficients p_n and p_n^1 are obtained in a similar way from equation (1).

c) From equation (3) follows:

from where the coefficients v_n and v_n^1 are determined.

d) From equation (4) ρ_n and ρ_n^1 are determined.

e) Finally, from equation (5) follows:

On the axis of symmetry $\Psi=0, v=0, v_0=0$. From equation (4) $\rho_0 = p_0^{1/\kappa}$ and from equation (5) follows:

$$\rho u \frac{\partial u}{\partial \Psi} + \rho v \frac{\partial v}{\partial \Psi} = -\frac{1}{\gamma} \frac{\partial p}{\partial \Psi}$$

Posebej dobimo: $r_n(x)=0, p_n^1(x)=0, v_n(x)=0, \rho_n(x)=0$ in $u_n^1=0$.
Glede na to so:

Specially obtained are: $r_n(x)=0, p_n^1(x)=0, v_n(x)=0, \rho_n(x)=0$ and $u_n^1=0$.
Accordingly:

$$\begin{aligned} r(x) &= \sqrt{\Psi_1} \sum_{n=0}^N r'_n(x) \Psi_1^n + r_0 \\ p(x) &= \sum_{n=0}^N p_n(x) \Psi_1^n \\ v(x) &= \sqrt{\Psi_1} \sum_{n=0}^N v'_n(x) \Psi_1^n \\ \rho(x) &= \sum_{n=0}^N \rho_n(x) \Psi_1^n \\ u(x) &= \sum_{n=0}^N u_n(x) \Psi_1^n \end{aligned} \quad (21).$$

Posamezni koeficienti so:

The particular coefficients are:

$$\begin{aligned}
 r'_0 &= \left(\frac{2}{u_0 \rho_0} \right)^{1/2} \\
 r'_1 &= -\frac{1}{4} r'_0 \left(\frac{u_1}{u_0} + \frac{\rho_1}{\rho_0} \right) \\
 p_1 &= -\kappa \frac{1}{r'_0} \frac{\partial v_0}{\partial x} \\
 p_2 &= -\frac{1}{2} \kappa \frac{1}{r'_0} \frac{\partial v'_1}{\partial x} - \frac{1}{2} p_1 \frac{r'_1}{r'_0} \\
 v'_0 &= u_0 \frac{\partial r'_0}{\partial x} \\
 v'_1 &= u_1 \frac{\partial r'_0}{\partial x} + u_0 \frac{\partial r'_1}{\partial x} \\
 u_0 &= \left(\frac{\kappa+1}{\kappa-1} - \frac{2}{\kappa-1} p_0^{\kappa-1/\kappa} \right)^{1/2} \\
 u_1 &= -\frac{1}{\kappa} \frac{1}{\rho_0 u_0} p_1 - \frac{1}{2} \frac{(v'_0)^2}{u_0} \\
 \rho_0 &= p_0^{1/\kappa} \\
 \frac{\rho_1}{\rho_0} &= \frac{p_1}{\kappa p_0}
 \end{aligned} \tag{22}$$

Izračun koeficientov začnemo z znanim $p(x,0)$ iz enačbe (14).

Koeficienti za dvoizмерно šobo so drugačni, dobimo pa jih na podoben način.

Prehod na realne parametre za določene robne pogoje na vходу in izhodu je preprost.

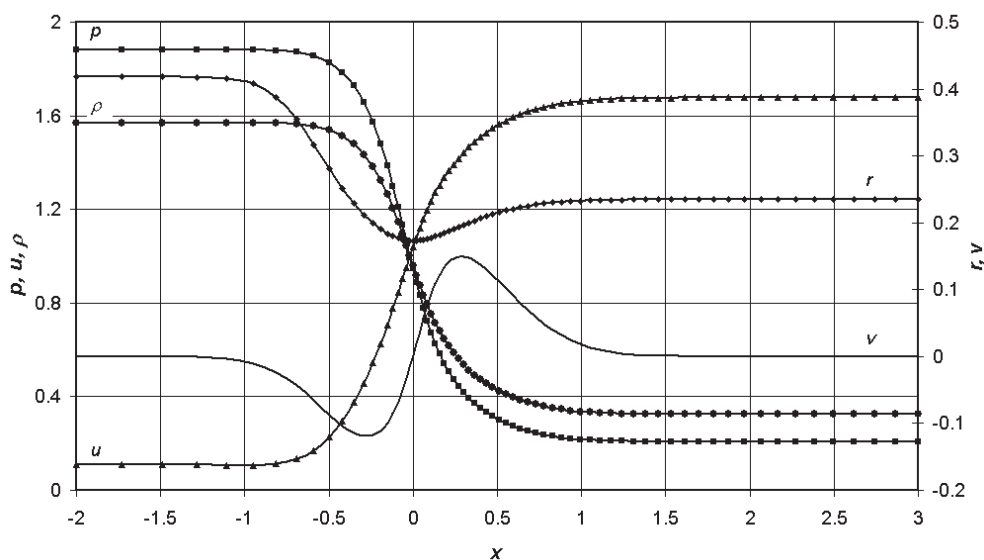
Na opisani način dobljene krivulje $\Psi = \text{konst.}$ ($\Psi_1=0,001$ kot začetni pogoj in z iterativnim postopkom $\Psi_2=0,005$, $\Psi_3=0,01$ in $\Psi_4=0,015$) so prikazane na sliki 1. V koordinatnem sistemu x, r za $\Psi=0,015$ smo izračunali parametre u, v, ρ in r po enačbah (6) in (7) za tlak p , določen po enačbi (14). Prikazani so na sliki 2.

The calculation of the coefficients starts with the known $p(x,0)$ from equation (14).

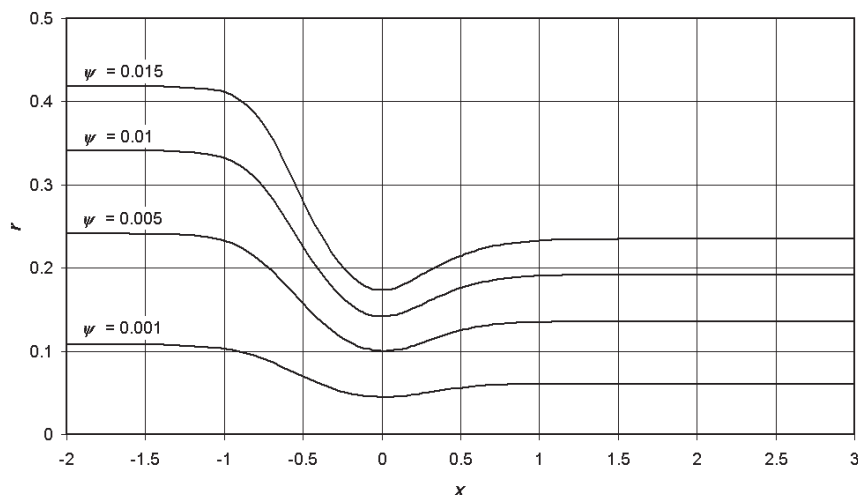
The coefficients for a two-dimensional nozzle are different, and they are obtained in a similar way.

The transition to the real parameters for the set boundary conditions on the input and output is simple.

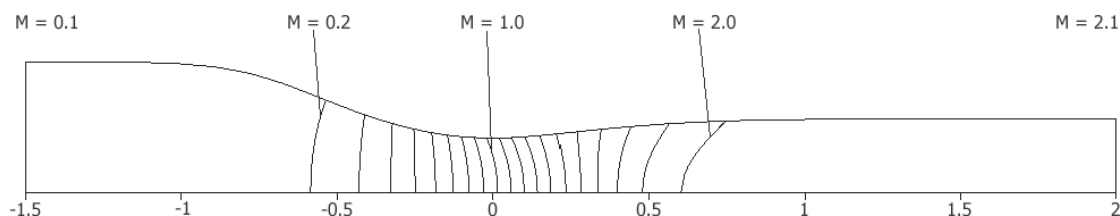
In the described manner the obtained curves $\Psi = \text{konst.}$ ($\Psi_1=0.001$ as initial condition and by the iterative procedure $\Psi_2=0.005$, $\Psi_3=0.01$ and $\Psi_4=0.015$) are presented in Figure 1. In the coordinate system x, r for $\Psi=0.015$ the parameters u, v, ρ and r were calculated by equations (6) and (7) for the set pressure p according to equation (14) and they are presented in Figure 2.



Sl. 1. Polmeri šobe za $\Psi = \text{konst.}$, dobljeni z opisano metodo
Fig. 1. The nozzle radii for $\Psi = \text{konst.}$ obtained by the described method



Sl. 2. Normirani parametri u, v, r in ρ za $\Psi = 0,015$
Fig. 2. The normalised parameters u, v, ρ and r for $\Psi = 0,015$



Sl.3. Profil šobe in krivulje enakih hitrosti (Machovih števil)
Fig. 3. The profile of the nozzle and the curves of constant velocities (i.e. of Mach numbers)

Na sliki 3 so za določene mejne pogoje in začetni pogoj prikazani profil šobe in krivulje enakih hitrosti (oz. Machovih števil).

S slike 2 vidimo, da so vse spremenljivke nespremenljive za $-2 \leq x < -1,5$ in $2 < x \leq 3$ in da ta del šobe ni potreben (ravni del povzroči turbulentno mejno plast). Zato je na sliki 3 prikazana prostorska oblika šobe za $-1,5 \leq x \leq 2$.

Za določene mejne pogoje in dobljeno obliko $r = r(x)$ za $\Psi = 0,015$ smo izvedli izračun z najbolj znanim programom FLUENT. Kot rezultat smo dobili normirane (bezdimenzijske) vrednosti spremenljivk p, u, v in ρ kot funkcije x .

Relativna razlika najvplivnejše spremenljivke $p(x)$, izračunana z uporabo programa FLUENT po določeni enačbi (14), kaže zelo majhno odstopanje spremembe tlaka. Z naslednjim primerom je prikazano, da te razlike ne vplivajo na rezultate toka v kritičnem prerezu in na izhodu iz šobe. S tem je pokazano, da je predstavljena metoda natančna kakor FLUENT. Dejansko natančnost obeh izračunov je treba preveriti z natančnimi meritvami.

Primer. Izberemo: $\dot{m} = 0,5 \text{ kg/s}$; $\bar{T}_{tot} = 300 \text{ K}$; $\bar{p}_{out} = 101 \text{ 300 Pa}$; $Ma_{in} = 0,1$; $Ma_{out} = 2,1$; $\gamma = 1,4$; $R = 287 \text{ J/kgK}$.

Z osnovnim izračunom za izentropni tok dobimo:

Na vstopnem prerezu:

$$\bar{T}_{tot,in} = 299,4 \text{ K} = \bar{T}_{tot}; \bar{p}_{tot,in} = 926 \text{ 400 Pa} = \bar{p}_{tot};$$

Finally, for set boundary and initial conditions the profile of the nozzle and the curves of constant velocities (i.e. of Mach numbers) are given in Fig. 3.

From Figure 2 it is evident that all variables are constant for $-2 \leq x < -1,5$ and $2 < x \leq 3$ and this part of the nozzle is unnecessary (the flat part generates the turbulent boundary layer). Therefore, the three-dimensional shape of the nozzle is presented in Figure 3 for $-1,5 \leq x \leq 2$.

For the set boundary conditions and the obtained shape $r = r(x)$ for $\Psi = 0.015$ the calculation with the best-known application code FLUENT is performed. As a result, the normalised (non-dimensional) values of the variables p, u, v and ρ are obtained as a function of x .

The relative difference of the most influential variable $p(x)$ from the calculation with FLUENT according to the set equation (14) shows a very small deviation of the pressure change. The example below illustrates that these differences do not influence the results of flow in the critical section and on the nozzle outlet. This shows that the proposed method is at the FLUENT accuracy level. The real accuracy of both calculations needs to be checked with a precise measurement.

Example. Known: $\dot{m} = 0.5 \text{ kg/s}$; $\bar{T}_{tot} = 300 \text{ K}$; $\bar{p}_{out} = 101 \text{ 300 Pa}$; $Ma_{in} = 0.1$; $Ma_{out} = 2.1$; $\gamma = 1.4$; $R = 287 \text{ J/kgK}$.

By elementary calculation for isentropic flow the following values are obtained.

At the input section:

$$\bar{T}_{tot,in} = 299.4 \text{ K} = \bar{T}_{tot}; \bar{p}_{tot,in} = 926 \text{ 400 Pa} = \bar{p}_{tot};$$

V kritičnem prerezu:

$$\bar{T}_{throt} = 250 \text{ K}; \bar{p}_{throt} = 489\,400 \text{ Pa}; \bar{\rho}_{throt} = 6,821 \text{ kg/m}^3;$$

$$\bar{u}_{throt} = 316\,938 \text{ m/s}; \bar{r}_{throt} = 8,58 \text{ mm};$$

Na izstopnem prerezu:

$$\bar{T}_{out} = 159,4 \text{ K}; \bar{u}_{out} = 531,46 \text{ m/s};$$

$$\text{Za } \Psi = 0,815 \text{ iz } r_* = \frac{\bar{r}_{throt}}{r_{min}} = \frac{0,00858}{1,1735} = 0,05 \text{ sta vstopni}$$

in izstopni polmer:

$$\bar{r}_{in} = r_{in} r_* = 0,418 \cdot 0,05 = 20,9 \text{ mm};$$

$$\bar{r}_{out} = r_{out} r_* = 0,207 \cdot 0,05 = 10,35 \text{ mm},$$

in dolžina šobe:

$$\bar{L} = (1,5 + 2)0,05 = 175 \text{ mm}.$$

3 SKLEP

V tem prispevku je prikazana stabilna inverzna računsko metoda za oblikovanje nadzvočne šobe z uporabo izvirnega analitičnega izraza za padec tlaka na osi šobe. Na slikah je vidna pravilnost spremembe značilnih parametrov vzdolž šobe. Z uvedbo analitičnega izraza za spremembo tlaka lahko z izbiro koeficienta b v enačbi (14) oblikujemo tako daljše kakor krajše šobe. Raziskava je uporabna tudi za dvoizmerne in krožne šobe. Rezultati se dobro ujemajo z izračunom z uporabo programa FLUENT za izbrano obliko šobe.

In the critical section:

$$\bar{T}_{throt} = 250 \text{ K}; \bar{p}_{throt} = 489\,400 \text{ Pa}; \bar{\rho}_{throt} = 6.821 \text{ kg/m}^3;$$

$$\bar{u}_{throt} = 316\,938 \text{ m/s}; \bar{r}_{throt} = 8.58 \text{ mm};$$

At the outlet section:

$$\bar{T}_{out} = 159.4 \text{ K}; \bar{u}_{out} = 531.46 \text{ m/s};$$

$$\text{For } \Psi = 0.815 \text{ from } r_* = \frac{\bar{r}_{throt}}{r_{min}} = \frac{0.00858}{1.1735} = 0.05 \text{ the inlet}$$

and outlet radii are:

$$\bar{r}_{in} = r_{in} r_* = 0.418 \cdot 0.05 = 20.9 \text{ mm};$$

$$\bar{r}_{out} = r_{out} r_* = 0.207 \cdot 0.05 = 10.35 \text{ mm},$$

and the nozzle length:

$$\bar{L} = (1.5 + 2)0.05 = 175 \text{ mm}.$$

3 CONCLUSION

This paper presents a stable numerical design method for a supersonic nozzle by the introduction of an original analytical expression for the pressure drop on the axis of the nozzle. The figures show the regularity of the change of the characteristic parameters along the nozzle. Furthermore, by introducing an analytical expression for the pressure distribution it is easily possible, by selecting a coefficient b in equation (14), to design both a longer and a shorter nozzle. The research is also applicable to two-dimensional and annular nozzles. These results agree well with the calculation using the application code FLUENT for the obtained shape of the nozzle.

4 OZNAKE

4 NOMENCLATURE

približna kritična hitrost	a_*	m/s	approximate critical velocity
dejanska oz. normirana dolžina šobe	$\bar{L}, L$	m	real i.e. normalised length of nozzle
Machovo število	Ma		Mach number,
masni pretok	$\dot{m}$	kg/s	mass flow rate
dejanski oz. normirani tlak	$\bar{p}, p$	Pa	real, i.e. normalised pressure
posamična plinska konstanta, za zrak 260 J/kgK	R		unit gas constant, for air 260 J/kgK
dejanska oz. normirana radialna koordinata	$\bar{r}, r$	m	real, i.e. normalised radial coordinate
kritični polmer	r_*	m	critical radius
dejanska oz. normirana temperatura	$\bar{T}, T$	K	real, i.e. normalised temperature
dejanska oz. normirana komponenta hitrosti $\bar{w}$ v smeri osi šobe	$\bar{u}, u$	m/s	real, i.e. normalised component of velocity $\bar{w}$ in direction of the axis of the nozzle
dejanska oz. normirana komponenta hitrosti $\bar{w}$ v smeri pravokotno na os šobe	$\bar{v}, v$	m/s	real, i.e. normalised component of velocity $\bar{w}$ perpendicular to the axis of the nozzle
hitrost	$\bar{w}$	m/s	velocity
dejanska oz. normirana koordinata vzdolž osi simetrije šobe	$\bar{x}, x$	m	real, i.e. normalised coordinate along the axis of symmetry of the nozzle
dejanska oz. normirana koordinata pravokotno na os šobe	$\bar{y}, y$	m	real, i.e. normalised coordinate perpendicular to the axis of the nozzle
koeficient izentropije, za zrak 1,4	κ		isentropic exponent, for air 1,4
dejanska oz. normirana gostota	$\bar{\rho}, \rho$	kg/m ³	real, i.e. normalised density
dejanska oz. normirana funkcija tokovnice	$\bar{\Psi}, \Psi$	kg/s	real, i.e. normalised stream function

Indeksi:

na vstopnem prerezu šobe
na izstopnem prerezu šobe
skupna vrednost
v vratu šobe
na osi simetrije šobe

in
 out
 tot
 $trot$
 0

Subscripts:

at input section of nozzle
at output section of nozzle
total value
in throat of nozzle
on axis of symmetry

5 LITERATURA

5 REFERENCES

- [1] Minkowycz, W.J., E.M. Sparrow, G.E. Schneider and R.H. Pletcher (1988) Numerical heat transfer, *Wiley, New York*, 787-834.
- [2] Shimura, K., Y. Asako and J.H. Lee (1994) Numerical-analysis for supersonic flows in a cooled nozzle, *Numerical Heat Transfer* 26, 631-641.
- [3] Cler, D., M. Lamb, S. Farokhi, R. Taghavi and R. Hazlewood (1996) Application of pressure-sensitive paint in supersonic nozzle research, *Journal of Aircraft* 33, 1109-1114.
- [4] Demetriades, A. (1996) Stabilization of a nozzle boundary layer by local surface heating, *AIAA Journal* 34, 2490-2495.
- [5] Tsunoda, K., T. Suzuki and T. Asai (2000) , *Journal of Fluids Engineering* 122, 585-591.
- [6] Anderson, J.D. (1995) Computational fluid dynamics, *McGraw-Hill, New York*, 772.
- [7] Pirumov, U.G. and G.S. Rosljakov (1978) Gas flow in nozzles (in Russian), *Moskovskij univerzitet, Moskva*, 351.

Naslov avtorjev: doc.dr. Vinko Martinis
prof.dr. Branimir Matijašević
mag. Željko Tuković
Zavod za energetska postrojenja
Fakultet strojarstva i brodogradnje
Sveučilište u Zagrebu
Ivana Lučića 5
HR-10000 Zagreb, Hrvatska

Authors' Address: Doc.Dr. Vinko Martinis
Prof.Dr. Branimir Matijašević
Mag. Željko Tuković
Department of Power Eng.
Faculty of Mechanical Eng.
and Naval Architecture
University of Zagreb
Ivana Lučića 5
HR-10000 Zagreb, Croatia

Prejeto: 15.3.2001
Received:

Sprejeto: 23.5.2002
Accepted:

Naprava s pnevmatično aktivno površino: Razvoj prototipa in Ljapunovova analiza stabilnosti

A Pneumatic Active-Surface Device: Prototype Design and Lyapunov Stability Analysis

Suzana Uran - Riko Šafarič - Tobias Winther

Pomanjkanje proizvodnih tehnik za premikanje in spreminjanje usmerjenosti (manipulacijo) velikega števila majhnih predmetov pomeni tehnološko oviro za tržni uspeh na različnih področjih mikro elektromehanskih sistemov (MEMS). V članku je predstavljen bistveno nov način avtomatizacije množične paralelne manipulacije majhnih predmetov. Raziskana je naprava s pnevmatično aktivno površino (NPAP). Ustrezna izbira sile, ki jo povzroča pihanje ali sesanje zračnega toka skozi cevke naprave z aktivno pnevmatično površino, povzroča željeno premikanje predmetov na aktivni površini naprave. Naprava omogoča veliko gibljivost in hitrost in jo lahko uporabimo za pozicioniranje, orientiranje, identifikacijo, sortiranje, podajanje in sestavljanje predmetov. Dodatno k temu lahko vodimo mnogo predmetov hkrati. Ta članek kratko opisuje eksperimentalno delo, opravljeno na prototipu naprave s pnevmatično aktivno površino.

© 2002 Strojniški vestnik. Vse pravice pridržane.

(Ključne besede: deli mali, manipulacija predmetov, polja pnevmatična, stabilnost predmetov)

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 automated, massive, parallel manipulation of small-sized parts is explored in this paper: the pneumatic active surface device (PASD). The appropriate choice of force, caused by blowing or sucking air-flow through the tubes of the PASD, is shown to cause objects that are placed on the array to be moved in ways that are useful. It offers great flexibility and speed and it can be employed to position, orient, identify, sort, feed, and assemble parts or objects. In addition, several objects can be controlled simultaneously. This paper briefly describes experimental work done on a PASD.

© 2002 Journal of Mechanical Engineering. All rights reserved.

(Keywords: small parts, objects manipulation, pneumatic fields, objects stability)

0 UVOD

Množična proizvodnja miniaturnih komponent kakor so integrirana vezja, mikro elektromehanski sistemi (MEMS) itn. zahtevajo bistvene izboljšave na področju manipulacije predmetov. Te komponente so izdelane na podlagi postopka mikroproizvodnje, ki izvira iz tehnologije (ZVI - VLSI). Le ta omogoča proizvodnjo tisočev ali milijonov komponent hkrati. Naprava s pnevmatično aktivno površino (NPAP) uporablja nov način avtomatizirane manipulacije predmetov. Namesto manipulacije posameznih predmetov (npr. z robotskim prijemalom [12]) s pomočjo naprave s pnevmatično aktivno površino premikamo mnoge predmete hkrati. Naprava s pnevmatično aktivno površino omogoča vzporedno

0 INTRODUCTION

Mass production of miniature components such as integrated circuits, micro-electro-mechanical systems (MEMS), etc., requires fundamental innovations in the handling of parts. These components are built using microfabrication processes derived from VLSI technology, which allows thousands or millions of components to be manufactured in parallel. A pneumatic active surface device (PASD) uses a new approach to the automated manipulation of parts. 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 automation device permits parallel and distributed, sensing and actuation, and

in porazdeljeno zaznavanje in aktiviranje in je še posebno primerna za manipulacijo serijsko mikroproizvedenih predmetov, katerih majhne izmere (manj kot milimeter) in veliko število ne omogočajo običajne manipulacije z robotskimi prijemači.

V zadnjem času so bile razvite mnoge podobne naprave:

1. Programljivo polje sil je matrika velikega števila programljivih točk mikrogibanja ([1] in [5]). Pri vodenju gibanja predmetov po programljivem polju sil je uporabljena strategija "ožajočih se vzorcev" ([1], [2] in [7]) ob uporabi analize ravnotežnega stanja ([1] do [3]). Naprava je opisana v [1] in [2] in ima pomembne lastnosti, to so: občutljiva je na poškodbe in nima vgrajenih zaznaval. Zato za premikanje predmetov po njej ni mogoča izvedba zančnega vodenja. Naš način 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. Iz tega razloga naš način omogoča izvedbo zančnih tehnik vodenja.
2. Navidežno vozilo [4] je zgrajeno iz celic, ki predstavljajo mehanizem z dvema prostostnima stopnjama. Za vodenje vsake izmed celic je uporabljen zapleten postopek vodenja, saj je za vodenje vsake celice potreben mikroprocesor (MC68HC11). Vsaka celica je informacijsko povezana 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 tisočimi celicami, ki bi premikale mikroskopsko majhen predmet. Osnovna celica naše naprave (ceevka 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 za njih ni poročil o uporabljenih strategijah vodenja predmetov po matriki. Naše tehnike vodenja omogočajo od oblike predmeta neodvisno razklenjeno in zančno vodenje osnovnih premikov in usmeritev (translacija, rotacija) za toge in elastične predmete. Nekatera poročila o vodenju in manipulaciji predmetov na programljivem polju sil so v [1] do [3] in [7] in so delno vplivala na razvoj naših tehnik vodenja.
4. Mnoge skupine raziskovalcev MEMS so zgradile izvršilniške matrike za mikromanipulacijo, ki so običajno zgrajene iz 'gibalnih točk'. Naprave so zgradili prej omenjeni avtorji [1], [4] do [6] in v [8] do [11].

is particularly attractive for handling batch microfabricated objects, whose small dimensions (sub-millimeter) and large numbers do not allow conventional pick-and-place operations using robot grippers.

Recently, several similar devices have been invented:

1. The programmable force field – a massive parallel array of programmable micromotion pixels ([1] and [5]) – uses a control strategy called "squeeze patterns" ([1], [2] and [7]) with equilibrium analysis ([1] to [3]). The device described in [1] and [2] has a major disadvantage: 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 programmable force fields. Our approach uses pressure sensors for sensing an object on the surface of the PASD, which allows us to use object recognition from the footprint of the object sensed by the pressure sensors as well as closed-loop position techniques.
2. The Virtual Vehicle [4] uses a complicated control technique for each cell, for which a complete microprocessor (MC68HC11) is needed to control a two-degree-of-freedom mechanical mechanism. Each cell is linked to the other cells with a RS232 serial link. It is impossible to imagine how much communication and computer power would be needed in the case of an array of a few hundred thousand micromachined actuators (cells) used to carry near-microscopic objects. The basic cell (a tube and a pressure sensor) of our devices which is designed for carrying near-microscopic objects, is controlled in a simpler way: only one micro-processor (MC68000) would be 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 described. 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 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 that usually consist of "motion pixels". Devices were built by the previously mentioned authors [1], [4] to [6] and also by [8] to [11].

1 NAPRAVA S PNEVMATIČNO AKTIVNO POVRŠINO

1.1 Načrtovanje prototipa

Prototipna naprava vsebuje množico vzporednih cev, katerih konci predstavljajo gladko površino (aktivno površino). Na tej površini lahko objekt opazujemo in z njim izvajamo operacije manipulacije. Cevke pihajo oziroma sesajo zrak na površino ali z nje. Zračni tok skozi vsako posamezno cevko je krmiljen z uporabo dvopoložajnega ventila, ki vodi na površino zrak z nadtlakom ali pa zrak s podtlakom glede na atmosferski zračni tlak. Zračni tok zaradi nadtlaka potiska objekt stran od konca cevke, medtem ko podtlak generira akcijo sesanja oziroma premikanja objekta v smeri proti koncu cevke, ali pa objekt prisesa na površino. Med premikanjem objekta po površini se morajo posamezni ventili odpirati in zapirati v ustreznem zaporedju. Zračni tokovi pod in nad objektom in okoli njega spreminjajo lego objekta in pot njegovega premikanja na površini. Z ustrezno spremenjenimi zračnimi tokovi lahko dosežemo vzdolžno ali vrtilno premikanje. V vsaki cevki je montirano tudi zaznavalo zračnega tlaka med aktivno površino in ventilom. Če je podtlak pripeljan na cevko in če je vrh cevke pokrit z objektom, tedaj zaznavalo tlaka izmeri drugačno vrednost kakor v primeru, če je vrh cevke prost. Z branjem vrednosti zaznaval tlaka v vseh cevkah (ko je v vseh cevkah podtlak) se lahko določi lega objekta na aktivni površini. Računalnik prek ločenega elektronskega vezja obdeluje in prikazuje izhode zaznaval tlaka in hkrati krmili vse ventile cevk. Poenostavljeno shemo prototipa prikazuje slika 1, kjer je narisanih samo nekaj cevk, ventilov, zaznaval tlaka, vira podtlaka in nadtlaka, električne linije, krmilni mikroročunalnik in aktivna površina, po kateri se rokuje z objektom.

V naslednjih poglavjih bomo predstavili posamezne komponente prototipa obširneje. Celoten sistem NPAP prikazujeta sliki 2 in 3. Slika 2 prikazuje meritev lege dveh ločenih objektov na aktivni površini. Zgornji zaslon je povezan s kamero, ki je uporabljena zgolj za uporabnikov vizualni nadzor dogajanja na površini. Spodnji zaslon pa je povezan na osebni računalnik, ki se uporablja za komunikacijo človek - stroj in prikazuje izmerjeno lego objekta na površini.

Aktivna površina (slika 3a) je zgrajena iz 100 steklenih kapilarnih cevk z zunanjim premerom 0,4 mm, ki so zalite v blok z Lexan®-om in epoksidno smolo (slika 3b). Na površini cevk tvorijo šesterkotni vzorec zaradi čim bližjega pakiranja cevk v bloku (slika 2). Na drugem koncu so steklene cevke povezane s cevmi za dovajanje nadtlaka oziroma podtlaka.

Povezave zračnih vodov in zaznaval tlaka. Vsaka cev za dovajanje nadtlaka oziroma podtlaka gre na t.i. T-konektor, v katerem je vgrajeno zaznavalo tlaka. Iz T-konektorja vodi druga cev do ventila. Prostornina zraka

1 PNEUMATIC ACTIVE SURFACE DEVICE

1.1 Prototype Design

The prototype device contains a bundle of parallel tubes, the ends of which make up a smooth surface (the active surface). This is the surface on which an object is observed and handled. The tubes lead air to and from the surface. The airflow through each tube is controlled with two-position valves, one valve per tube. In one position pressurized air is supplied to the tube, in the other position a vacuum is created, generating a sucking action. The pressurized air is used to push an object away, while the vacuum is used to pull an object or draw it to the surface. As the object moves, various valves are opened and closed as required. Air streams below, above and around the object modify the position of the object and the path that it follows. The air streams can be used to provide both translational and rotational motion. A pressure sensor is attached to each tube between the active surface and the valve. If a vacuum is created and an object covers the end of a tube, then the pressure in that tube will drop more than in an uncovered tube. By reading the pressure in each tube, while the tube is being evacuated, the location of an object on the surface can be identified. A computer that is connected to a separate electronics board is used to process and present the sensor outputs. The computer and the electronics board are also used to control the position of the individual valves. A simplified drawing of the prototype is shown in Fig. 1; the figure is schematic and shows only a few tubes, valves, pressure sensors, the vacuum, air and electrical lines, the controller, and the active surface where the part is manipulated. The actual prototype has 100 tubes.

In the following paragraphs each of the individual components of the system is described in more detail. The complete system is shown in Figures 2 and 3. Figure 2 shows the measurement of the position of two separate objects on the PASD. The upper screen is connected to a camera, which is only used for user's visual control. The lower screen is connected to a personal computer, which is used for man-machine communication and shows the measured position of the objects on the PASD.

Active surface: The active surface (Figure 3a) is built from 100 glass capillary tubes (outer diameter 0.4 mm) mounted in a block of Lexan® and epoxy (Figure 3b). At the surface the tubes are in the hexagonal pattern of closest packing (Figure 2). At the opposite end of the block the glass tubes are connected to vacuum/pressure tubes.

Air connections and pressure sensors: Each vacuum/pressure tube joins a T-connector onto which the pressure sensor is mounted. From the T-connector another tube goes to the valve. The air

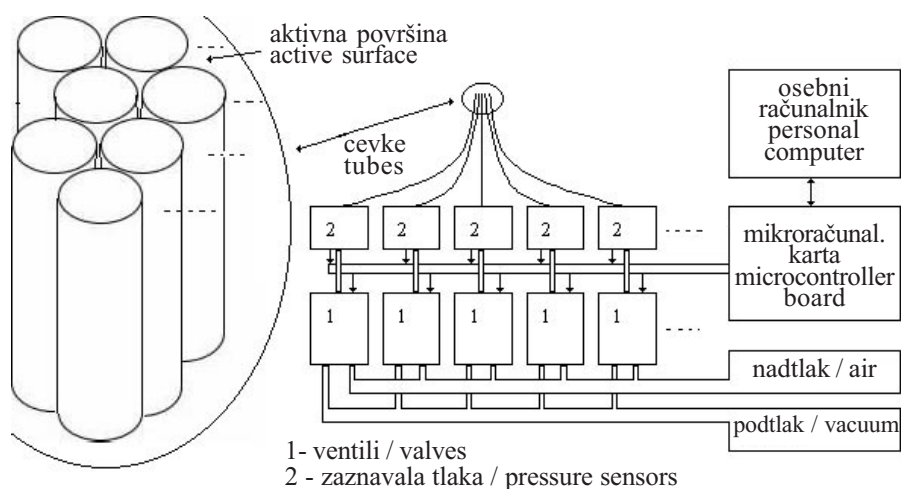
v kapilarni stekleni cevki in cevi za dovajanje nadtlaka oziroma podtlaka med aktivno površino in ventilom mora biti enaka za vse cevke, zato da se zagotovi čim bolj enoten odzivni čas vseh cevk. Zaznavala tlaka in aktuatorji ventilov so postavljeni drug zraven drugega v isti cevki, ki vodi na površino.

Ventili in zagotavljanje podtlaka in nadtlaka.

Uporabljeni majhni dvopoložajni solenoidni ventili imajo dva vhoda in en izhod. Ventili so vgrajeni v ploščo, narejeno iz Lexan-a z notranjimi vodi za dovod podtlačnega in nadtlačnega zraka in skozi povezovalne luknje vodijo do T-konektorjev. Cevi za dovod nadtlačnega in podtlačnega zraka so zalite v blok z epoksidno smolo. Dovodni vodi za podtlačni in nadtlačni zrak so pritrjeni na vir podtlaka in nadtlaka v pravih razdaljah, kar onemogoča nihanja tlaka v vodih.

volume (capillary glass tube plus vacuum/pressure tube) between the active surface and the valve is the same for each of the tubes to ensure a uniform response time for all the tubes. The pressure sensors and the valve actuators are collocated in the same tube that leads to the tube's open-end on the PASD.

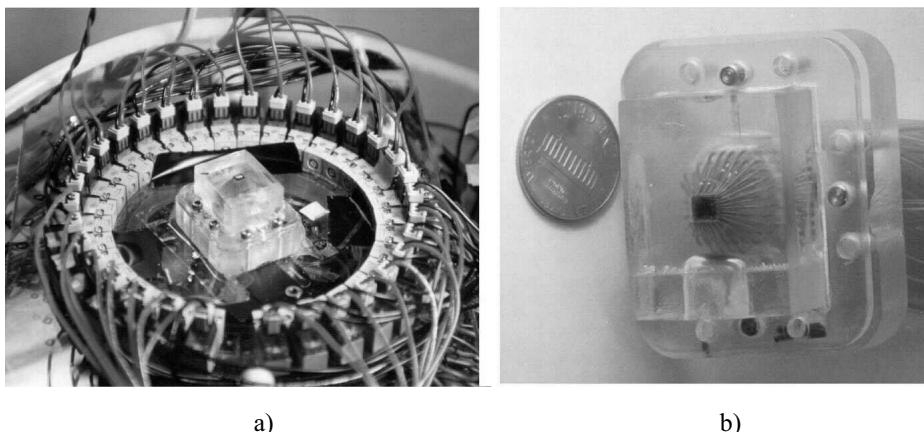
Valves and air/vacuum supply: The valves used are small, 3-way, 2-position, solenoid valves. They are placed on Lexan® boards with internal ducts for the air and vacuum supply and through holes for connections to the tubes leading to the T-connections. The vacuum/pressure tubes from the T-connectors are mounted using epoxy. The supply ducts are hooked up to air and vacuum manifolds at regular intervals to avoid pressure variations along the ducts.



Sl. 1. Poenostavljena shema naprave s pnevmatično aktivno površino
Fig. 1. Simplified drawing of the active-surface device



Sl. 2. Celoten sistem naprave s pnevmatično aktivno površino
Fig. 2. The complete system of the pneumatic active-surface device



a)

b)

Sl. 3. Pogled na aktivno površino iz stotih steklenih cev
Fig. 3. A view of the active surface consisting of 100 glass tubes

Električne povezave. Ventili in zaznavala tlaka imajo ožičene električne povezave z elektronskim vezjem naprave. Elektronsko vezje vsebuje razdeljevalnike (múltiplexorje), ki so uporabljeni za spreminjanje stanja ventilov, za naslavljanje posameznih ventilov in zaznavanje ter branje izhodnih vrednosti zaznav. Ko se enkrat stanje ventila spremeni, ostane lega ventila nespremenjena do naslednje zahteve po spremembi. Samo en ventil oziroma eno zaznavalo tlaka je naslovljen v posameznem trenutku (času tipanja); samo naslavljanje je izvedeno vsakih 3 do 5 ms, kar je prehodni čas odziva posameznega ventila. To pomeni, da se veliko število ventilov lahko spremeni praktično v istem času.

Programska oprema. Karta električnega vezja se krmili iz navadnega osebne računalnika prek programa, napisanega v jeziku C++. Program izrisuje na ekranu osebne računalnika vzorec cev aktivne površine in prikazuje, katere cevke so pokrite oziroma odkrite, ko je ukaz "vse cevke sesajo" izveden. V času zagona naprave se izvede t.i. kalibracijski podprogram, ki medsebojno inicializira zaznavala tlaka, ko je aktivna površina enkrat pokrita in drugič odkrita ob izvajanju ukaza "vse cevke sesajo".

1.2 Možnosti uporabe

NPAP se lahko uporablja za opazovanje (detekcijo lege in usmeritve), premikanje, pozicioniranje, držanje in aktivno spuščanje objektov različnih geometrijskih oblik in velikosti.

Nekatere osnovne funkcionalne zmožnosti naprave so naslednje:

- **Premikanje.** Gibanje objekta na aktivni površini se doseže s kombiniranimi akcijami sesanja in pihanja zraka skozi cevke. Objekt lahko dobro nadzorovano premikamo v ravnini aktivne površine: dve kartezijski in ena rotacijska prostostna stopnja, medtem ko je v drugih smereh to precej težje izvesti.
- **Držanje.** Silo zaradi sesanja cev aktivne površine lahko uporabimo zato, da objekt prisesamo na površino.
- **Aktivno spuščanje.** Silo zaradi pihanja cev aktivne površine uporabimo za aktivno "odlepitev" objekta od aktivne površine.

Electrical connections: The valves and the pressure sensors have electrical connections to a circuit board. The board contains a number of multiplexers, some of which are used for changing the state of the valves, others for addressing a particular sensor to get a reading from it. Once the state of a valve has been changed it remains in this state. Only one valve or sensor is addressed at a time, however, they are addressed very quickly (much faster than the valve response time, which is between 3 and 5 ms) meaning that in practice numerous valves can be changed almost at the same time.

Software: The board is controlled from a regular PC with a C++ program. The program displays the pattern of tubes on the screen and shows which tubes are covered (when a "suck-on-all" command is executed). Before starting the operation there is a calibration routine to calibrate the pressure sensors (relative to each other) by creating a vacuum with and without the active surface being covered.

1.2 Potential Applications

An active-surface device can be used to observe, move, position, hold and actively release objects of widely different geometric shapes and sizes.

Some of the primary functional capabilities are listed below:

- **Moving.** Motion is achieved by the combined action of pressurized air and/or suction. It is well controlled in one plane: two Cartesian plus one rotational degree of freedom, less well controlled in the other dimensions.
- **Holding.** The suction force can be used to hold a part up against the active surface.
- **Releasing.** Pressurized air can be used to actively release a part from the surface.

- **Opazovanje.** Identifikacija oblike in lokacije objekta na aktivni površini se lahko izvede v dveh dimenzijah na način, ko se izmeri podpritis ali različne vrednosti zračnega pretoka v cevkah

Med dodatne možnosti uporabe NPAP v primerjavi s tradicionalnimi prijemali lahko prištevamo še:

- Lahko upravlja praktično katero koli geometrijo objekta, kar pomeni, da je naprava zelo prilagodljiva in zmanjšuje potrebo po menjavah orodja pri operacijah "vzemi in spusti".
- Na aktivni površini lahko neodvisno premikamo več objektov hkrati.
- Silo aktivne površine na objekt lahko krmilimo glede na število cevk, ki sesajo ali pihajo na objekt.
- Aktivna površina lahko »prime« objekt na točno določenih mestih (sesanje na samo izbranih cevkah), ne pa povprek, kakor je to izvedljivo pri tradicionalnih sesalnih prijemalih.
- Lahko aktivno sprostijo objekt, kar je zelo pomembno pri zelo majhnih objektih, ki se radi "prilepijo" na tradicionalno prijemalo.

Nekatere mogoče uporabe predstavljene naprave so:

- **Prijemalo ali vpenjalna glava.** Naprava omogoča podobne funkcije uporabe kakor tradicionalna orodja robotskih rok (prijemalo, robotska »roka«, sesalno prijemalo in podobno). Orodje robotske roke ima poleg možnosti prijemanja in spuščanja objektov še vgrajeno možnost usmerjanja v treh prostostnih stopnjah. Na primer, robotska roka z dovolj velikim prostorskim dosegom bi se lahko uporabila za premikanje naprave pnevmatične aktivne površine kot orodja na vrhu robotske roke. Takšna kombinacija robotskega orodja bi se uporabila za »prijem« objekta manjšega od 1 mm. Objekt na pnevmatični aktivni površini, kot del orodja robotske roke bi se nato premaknil v želeno lego, kjer bi dosegel tudi želeno usmerjanje in nato se aktivno spustil (odlepil) od aktivne površine, pri čemer bi premagal površinske sile med aktivno površino in majhnim in lahkim objektom.
- **Tekoči trakovi in površine.** Sistem tekočih trakov ali površin lahko zgradimo iz naprav s pnevmatično aktivno površino primernih velikosti in oblik. Vsak objekt, ki ga premikamo po takšnem sistemu, je sledljiv v vsakem trenutku in ne potrebuje vodil ali prekinitev na ovinkih. Ena stvar, ki jo običajni sistemi s tekočimi trakovi ne zmorejo, zmore pa jo naprava s pnevmatično aktivno površino, je, da se lahko različni objekti na aktivni površini pomikajo v različnih smereh (tudi nasprotnih) z različno hitrostjo. Namesto izraza tekočih trakov je tukaj bolj umestno govoriti o "aktivni površini". Dodatna prednost aktivne površine je, da se lahko objekti na površini tudi usmerijo in »pritrdijo« na zelenem mestu brez kakršnih koli posebnih dodatnih orodij ali pripomočkov na površini. To omogoča prilagodljivo sestavljanje, kjer se eden izmed objektov ustavi za potrebe sestavljanja, preostali

- **Sensing.** The shape and location of a part can be identified in two dimensions based on either the vacuum achieved in the different tubes or on airflow rates.

Some of the additional benefits of the device in comparison with a traditional gripper are:

- It can handle almost any geometry, i.e. it is very flexible and reduces the need for tool changes.
- Multiple parts can be moved independently of each other at the same time.
- A controlled force can be applied, depending on the number of cells pulling and pushing.
- It can grip objects in desired locations (by only sucking on selected tubes); not indiscriminately "all over" like a traditional suction-cup.
- It can actively release a part, this is particularly important for very small objects that tend to stick to traditional grippers.

Some of the potential applications are listed below:

- **Gripper or jig.** The device can perform a similar function to a traditional end-effector (gripper, robot "hand", suction-cup device or the like) on a traditional robot arm. However, besides gripping and releasing the end-effector has an inherent three degrees of freedom build into it. For example, a robot with a large spatial motion capability can be used to move the PASD around as an end-effector. The end-effector is moved to the part and used to grip it. The coarse motion system is then used to move the part close to the desired location, where the part is reoriented and repositioned on the active surface until it has the desired position, at which point the part is released actively overcoming the surface forces between the active surface and the part.
- **Conveyer belts and conveyer surfaces.** Conveyer systems can be built using active surfaces of suitable sizes and shapes. Each part being moved can be tracked at all times and no guides and no discontinuities at turns are required. One thing that the active surface can do that a normal conveyer cannot is to move each part at a different speed and in a different direction. It is even possible to have different pieces moving in opposite directions on the same conveyer belt. The term conveyer surface is used for this kind of device. Another benefit of the conveyer is that parts can be oriented and "clamped" in place while a process (e.g. assembly) takes place without hard fixtures. This makes it ideal for flexible assembly; when one part has stopped for assembly other parts are able to move on.
- **Reduced friction surface,** replacing wheels, roller

- objekti pa se še zmeraj prosto premikajo po površini.
- Zmanjšanje površine trenja. Z aktivno površino lahko nadomestimo kolesa, kroglične ležaje itn. Tako kakor pri magnetno lebdečih vlakih, lahko NPAP zmanjša trenje med objektom in okoljem, da se izvede učinkovitejši transport. Aktivna površina z vpihavanjem zraka med objekt in površino zmanjšuje trenje med njima.
 - Sestavljanje. NPAP se lahko uporabi tudi za sestavljanje. Na primer: predstavljajmo si situacijo, kjer se mora objekt A namestiti na ali v objekt B. Objekta A in B se premikata in pravilno usmerjata na dveh premikajočih se površinah na dveh ravneh z višinsko razliko med njima, ki je večja od višine spodnjega objekta. Krmilnik obeh aktivnih površin izračuna lego in usmeritev obeh objektov ter nato izvede medsebojno približevanje obeh objektov po najkrajši poti. Ko se objekta poravnata drug ob drugem, se objekt B z "zgornje" aktivne površine prestavi na spodnji objekt A in nato po spodnji površini odpelje do naslednjih delovnih operacij. Na ta način se lahko posamezni deli (objekti) sestavljajo med seboj v kakršni koli usmeritvi in na katerem koli mestu vzdolž obeh aktivnih površin.
 - Sortiranje. Napravo lahko uporabimo za sortiranje razsutih objektov, razpršenih po površini v primeru, da predstavljena naprava lahko zaznava razlike med posameznimi objekti. Te razlike so lahko variacije v velikosti ali obliki ali pa npr. razlike magnetnih lastnosti objektov, kar je seveda odvisno od narave objekta in tipa aktivne površine. Informacije z zaznaval se v krmilniku uporabijo za določitev poti individualnih objektov, s čimer dosežemo osnovo za sortiranje.
 - Usmerjanje objektov / podajanje objektov. V primeru, ko zaznavala zaznajo razliko med različnimi strannimi objekta, se lahko objekti sortirajo glede na to, na kateri strani trenutno ležijo na aktivni površini. Če ležijo na nepravi strani, jo lahko naprava s pnevmatično aktivno površino obrne na pravo stran. Ker se vsak posamezen objekt lahko vrti sam okoli sebe na aktivni površini, ga je mogoče usmeriti na uniformirani način, ki je kasneje uporabljen v nadaljnjem proizvodnem postopku.
 - Rokovanje z gibljivim materialom. Z napravo s pnevmatično aktivno površino lahko nadomestimo vrteče se valje pri strojih za manipulacijo papirja in tekstila. Lega materiala je ob uporabi aktivnih površin znana ves čas, zato lahko ob vsakršni neželjeni spremembi smeri pomika materiala izvedemo popravek premika gibljivega materiala, preden pride do zastoja. Tanke velike površine naprave s pnevmatično aktivno površino lahko nadomestijo velike vrteče se valje in druge premikajoče se sestavne dele sedanjih strojev za premikanje gibljivih materialov, ki zahtevajo med drugim tudi vzdrževanje (npr. mazanje).
 - Površina zaznavanja. Zmožnost zaznavanja naprave lahko v posameznih uporabah postane najpomembnejša. Na primer: mnogo prijemal pri svojem delovanju moti pogled umetnega vida, tako bearings, etc. In the same way that magnetically elevated trains provide a reduced-friction environment for efficient transportation, any active surface can provide a reduced-friction transportation surface by providing sufficient "repelling" force towards the object in motion.
 - Assembly. The device can perform assembly operations. For example consider a situation where a part A is to be inserted into a part B. If there are two opposing conveyer surfaces (with a clearance larger than the height of A + B) then type-A parts can be feed onto one surface while type-B parts are fed onto the other. The conveyer surfaces sense the location of each part and feed that information to a controller that calculates how the parts should be aligned in the fastest possible way and controls the conveyer surface to achieve this alignment. Once aligned, the parts are assembled by rejecting one part from one surface and sending it towards the other (preferentially from "top" surface to "bottom" surface) and then moving on to the next operation. In this way parts can be assembled in any orientation and at any place along the two conveyer surfaces.
 - Sorting. The device can be used for sorting loose parts that are spread over the surface if the device is capable of sensing the differences between the different parts. These differences could be variations in size or shape or differences in the magnetic properties, all depending on the nature of the part and the type of active surface. Information from the sensors can be used to determine the direction in which the individual parts are moved, thus forming the basis of sorting.
 - Parts orientation / parts feeding. If the different sides of the parts look different (or feel different to the sensors in the array) the parts can be sorted according to the down facing surface. If the wrong side is up the device can flip the object. As each part can be rotated individually parts with the right side up can be oriented within the plane and presented in a uniform way, for example, to a production system.
 - Flexible materials handling. There are several benefits of replacing rollers in paper-and-textile-handling machines with active surfaces: the position of the material is known at all times, if the material deviates from the desired direction corrective action can be taken before the system jams. Thin sheets of active surfaces can replace large rollers and there are no moving parts that require maintenance (e.g. lubrication).
 - Sensor surface. The sensory capabilities of the system can, in some applications, become the most important attribute. For example, many grippers obstruct the view for a machine-vision system,

da sistem krmiljenja v tem primeru izgubi zmožnost krmiljenja lege v sklenjeni zanki. Če je prejelo hkrati tudi zaznavalo lege, lahko ta problem zlahka odpravimo. V drugih okoliščinah bi lahko merjenje geometrijske oblike objektov (merjenje kakovosti), ki se premikajo po NPAP, izvajali kar med premikanjem objekta do črte sestavljanja, kar omogoča zelo izbrano rešitev.

- Delovna površina. Če so posamezne točke (odprtine) NPAP zmožne sprostiti različne kemikalije (plin, barvila, kemični reaktanti), je lahko aktivna površina zmožna prenosa premikajočega se objekta. Še posebej je pomembno, da je lahko obravnava objekta različna v odvisnosti od lokacije, torej so lahko posamezni deli objekta obravnavani na različne načine.

2 KRMILJENJE LEGE TOGIH PREDMETOV

Raziskali smo razklenjene, navidezno sklenjene in sklenjene strategije krmiljenja gibanja togih predmetov na napravi s pnevmatično aktivno površino (NPAP). Razklenjeno krmiljenje lege pomeni premikanje predmeta po površini NPAP brez zaznavanja lege predmeta. Čeprav je lega predmeta neznana, je predpostavljeno, da se bo predmet ustavil v želeni legi. Odprtozankno vodenje je pogosto uspešno, toda občasno se predmet zatakne na površini NPAP ali pa dejanska izvedba gibanja odstopa od želene. Iz tega razloga so bili razviti znančni postopki krmiljenja. V primeru navidezno zanknih postopkov vodenja se preverja lega predmeta le v končni legi giba, ne pa tudi v vmesnih korakih. Pri zanknem krmiljenju se natančna lega predmeta določa pogosto in se uporabi kot zanka informacija za položajno krmilo. S pomočjo zanknega krmiljenja se je bilo mogoče izogniti problemu zataknitve predmeta na NPAP, hkrati pa je mogoče tudi zaznati, ali ni morda predmeta odpihnilo z naprave. Zankni postopek krmiljenja je tudi bolj robusten za motnje, kakor so sprememba vhodnega tlaka v napravo.

Želena so tri različna osnovna gibanja predmeta:

- translacija predmeta,
- rotacija predmeta v ravnini naprave in
- obračanje predmeta.

Vsa tri osnovna gibanja predmetov so izvedena s tremi prej opisanimi strategijami krmiljenja. Za vsako vrsto gibanja in za vsak način obstaja mnogo različnih izvedb, npr. obstaja več različnih načinov za translacijsko gibanje. Zato lahko z ustrezno izbiro načina krmiljenje prilagodimo lastnosti predmeta, ki ga želimo premikati.

2.1 Analiza stabilnosti po Ljapunovu

Fizikalne osnove premikanja predmeta na PNAP so razložene na sliki 4. Razlika tlaka med cevko,

which makes closed-loop control very difficult. If the gripper is also the sensor system then this problem is eliminated. In other circumstances, measuring the geometry of parts as they pass by can be an important task (e.g. in quality inspection) and building a conveyor surface into an assembly line can provide a very elegant solution to this need.

- Processing surface. If some of the pixels (orifices) can discharge various chemicals (gases, dyes, reactants, etc.) the surface can be used to process the object being handled. Most importantly, the treatment can differ depending on the location, so some parts of the object get one treatment while other parts are treated differently.

2 POSITION CONTROL OF RIGID OBJECTS

We have been exploring open-, quasi-closed- and closed-loop control strategies for the motion of rigid objects on active-surface devices. Open-loop control is the movement of an object on the surface of a PASD without sensing the position of the object. Although the position of the object is not known it is assumed that the object will stop in a desired position. The method often works, but occasionally the object gets stuck on the surface or deviates from the desired track. Therefore, closed-loop control has been developed. In the case of quasi-closed-loop control the location of the object is verified at the end of the motion path only, not during any intermediate steps. In closed-loop control the exact position of the object on the surface is measured frequently and the current position of the object is used as closed-loop information for the position controller. With closed-loop control it has been possible to avoid problems relating to objects getting stuck and it is possible to detect if an object has been blown away. This type of control is also more robust in terms of disturbances such as changes to the input pressure of the device.

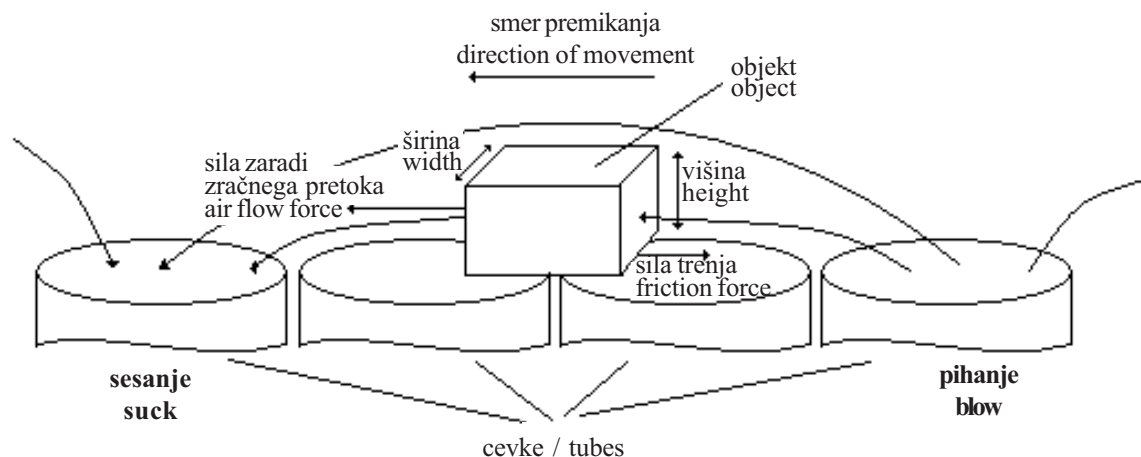
Three different, basic motions of a single object are desired:

- translation
- rotation
- flipping

Each of these motions can be addressed using one of the three basic approaches mentioned above. For each type of motion and each approach there are many different implementations, for example, there are many different approaches for open-loop translational motion. Furthermore, the nature of the object to be handled will influence the approach taken.

2.1 Lyapunov stability analysis

The basics of how an object is moved on the surface is explained in Figure 4. The difference in the



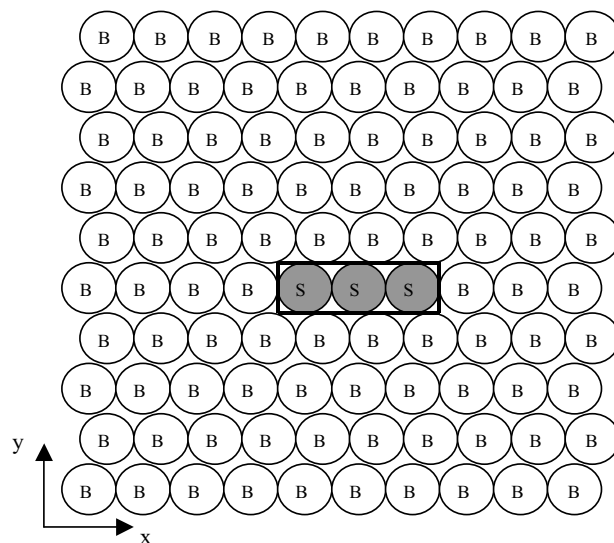
Sl. 4. Premik predmeta zaradi zračnega toka
Fig. 4. Movement of the object in the airflow

skozi katero se zrak sesa, in cevko, skozi katero zrak piha, povzroči zračni tok v smeri od pihajoče cevke k sesajoči cevki. Ta zračni tok povzroči silo v smeri od pihajoče cevke proti sesajoči cevki. Če je sila zračnega toka večja od trenja med predmetom in površino naprave, potem se predmet premika v smeri zračnega toka. Če je predmet pretežak, ali če je sila trenja prevelika, tedaj uporabimo podobno tehniko za premikanje. Slednja tehnika je podobna prej opisani, le da v tem primeru tudi cevke pod predmetom pihajo zrak in s tem zmanjšajo trenje.

Razklenjena strategija krmiljenja, kakor tudi navidezno zračna in zračna strategija vodenja za premikanje predmetov na NPAP sta postopka krmiljenja po korakih. To pomeni, da so večji premiki togega predmeta izvedeni kot zaporedje manjših premikov togega predmeta. razklenjeno krmiljenje predmeta lahko obravnavamo navidezno ustaljeno. Z ustaljenim stanjem potencialnega polja pritiska sta

pressure between a sucking and a blowing tube causes the air to flow from the blowing tube to the sucking tube. The airflow delivers a force in a direction from the blowing tube to the sucking tube. If the airflow force is higher than the friction force between the surface and the object, the object moves in the direction of the airflow. If the object is too heavy or if the friction force is too high then another similar technique is used. This technique works in the same way as the previously described basic technique, except that tubes that are covered with the object have to be set to blow in order that the friction is decreased.

The open-loop control strategy, as well as the quasi-closed and closed-loop control strategies are step-by-step control approaches for the movement of rigid objects on the PASD. This means that the gross motion of a rigid object is achieved in a sequence of steps that represent the fine motion of a rigid object. The open-loop motion of the object is considered as



Sl. 5. Potencialno polje tlaka za predmet v vodoravni usmeritvi
Fig. 5. Pressure potential field for an object in the horizontal orientation

enolično določena lega in usmeritev predmeta na NPAP. Primer potencialnega polja tlaka in z njim določene lege predmeta v vodoravni usmeritvi je prikazan na sliki 5.

Na sliki 5 je lega predmeta na NPAP prikazana s pravokotnikom, izrisanim s polno črto in s sivo barvo cevke, ki označuje cevke, pokrite s predmetom. Cevke s črko B pihajo zrak in imajo tlak višji od atmosferskega tlaka, medtem ko cevke s črko S sesajo zrak in imajo tlak nižji od atmosferskega tlaka. Predmet na sliki 5 je v ustaljenem stanju, določenem s prikazanim potencialnim poljem tlaka.

Vsak korak razklenjeno krmiljenje je posledica spremembe stanja potencialnega polja pritiska na NPAP. Ob spremembi potencialnega polja tlaka cevke, ki sesajo zrak, niso več pokrite s togim predmetom. Zato se vzpostavi zračni tok prek togega predmeta (sl. 4), tako da se predmet premakne, kakor je opisano v prvem odstavku podpoglavja 2.1. Premik togega predmeta je končan, ko ta ponovno pokrije cevke, ki sesajo zrak in se ponovno vzpostavi ustaljeno polje tlaka.

Predmete na NPAP lahko premikamo v različnih usmeritvah. Dve najbolj zanimivi usmeritvi: vodoravna in navpična usmeritev sta predstavljeni na sliki 6.

Iz vsakodnevnih izkušenj s predmeti na vodoravnih površinah kakor je miza, je znano, da so predmeti v vodoravni smeri stabilni, medtem ko so v navpični smeri labilno stabilni. Večja ko je višina predmeta v navpični smeri (razdalja med masnim središčem predmeta in vodoravno površino) v primerjavi z dolžino in širino predmeta, bolj labilna je stabilnost predmeta.

Stabilnost predmetov na NPAP je povečana v primerjavi s stabilnostjo istih predmetov na mizi. Povečano stabilnost predmetov na NPAP bomo prikazali na primeru predmeta v navpični smeri, ki na NPAP ni le labilno stabilen, temveč je stabilen.

quasi-stationary. With a stationary pressure potential field the position and the orientation of a rigid object on a PASD are uniformly defined. An example of the pressure potential field for a rigid object in a horizontal orientation is shown in Figure 5.

The position of the object on the PASD in figure 5 shows a rectangular plotted with a thick, solid line and gray-colored tubes covered by the object. The tubes with the letter B (blow) represent pressures higher than atmospheric pressure and the tubes with the letter S (suck) represent pressures lower than atmospheric pressure. The object in Figure 5 is in the stationary state determined by the pressure potential field.

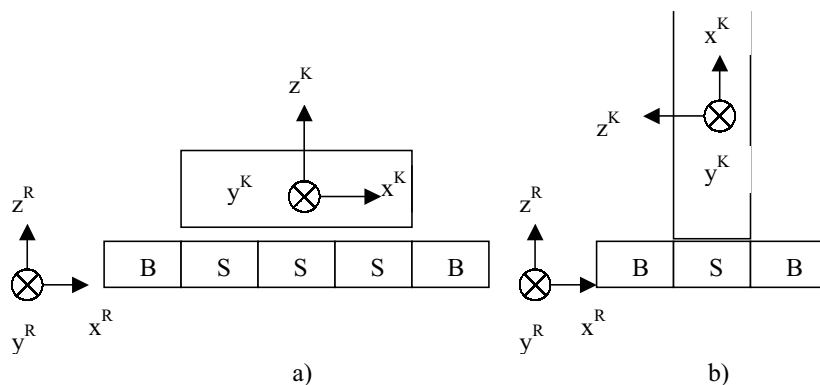
Each step of the open-loop motion is the result of a change in the pressure potential field on the PASD. With a change of the pressure potential field the sucking tubes are not covered by the rigid object anymore. Therefore, an airflow is established across the rigid object (see Figure 4) so that the rigid object is moved in the way described in the first paragraph of subsection 2.1. The fine motion of a step is finished when the rigid object covers the sucking tubes again and a stationary pressure potential field is re-established.

Objects on the PASD can be moved in different orientations. The two most interesting orientations, horizontal and vertical, are represented in Figure 6.

From everyday experience of an object on a flat, horizontal surface, for example, a table, we know that objects in a horizontal orientation are stable, while objects in a vertical orientation are labile stable. The greater the height of the object in the vertical orientation (the distance between the center of mass and the flat horizontal surface) in comparison with its length and its width the more labile is the stability of the object.

It will be shown for the case of an object in the vertical orientation that the stability of the object on the PASD is increased in comparison to the stability of the same object on the table: i.e. the object on the PASD in the vertical orientation is not labile stable but stable.

(x^K, y^K, z^K) – lastni koordinatni sistem objekta / eigenvalue coordinate system of the object
 (x^R, y^R, z^R) – referenčni koordinatni sistem objekta / reference coordinate system of the object



Sl. 6. a) Vodoravna in b) navpična usmeritev predmeta
 Fig. 6. a) Horizontal and b) vertical object orientation

Za izvedbo analize stabilnosti predmeta v navpični smeri na NPAP predpostavimo, da so cevke, iz katerih je zgrajena NPAP v smeri x in y urejene v ravne vrstice in stolpce. Gibanje predmeta na NPAP v navpični smeri (sl. 7) je naravno omejeno v negativni z^R smeri. Dodatno k naravni omejitvi gibanja bomo za izvedbo analize stabilnosti predpostavili, da ne obstajajo druga translacijska ali rotacijska gibanja predmeta razen vrtenja okoli osi y^R z osjo vrtenja v desnem spodnjem vogalu predmeta, kar je prikazano na sliki 7.

Gibanje predmeta je v takšnih razmerah definirano s sistemom enačb spremenljivk stanj:

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi}_y \\ \ddot{\phi}_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \phi_y \\ \dot{\phi}_y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{J_y^R} \end{bmatrix} \cdot \sum_i T_{yi} \quad (1)$$

kjer so: ϕ_y kot vrtenja okoli osi y^R , $\sum T_{yi}$ je vsota vseh vrtilnih momentov, ki delujejo na predmet, in J_y^R je vztrajnost predmeta okoli osi y^R referenčnega koordinatnega sistema. J_y^R je definirana po Steinerjevem pravilu in je vedno pozitivna.

For the stability analysis we have assumed that the tubes of the PASD in the x and y directions are arranged in straight rows and columns. The motion of the object on the PASD in the vertical direction (Fig. 7) is naturally constrained in the negative z^R direction. In addition to this natural constraint we will consider, for the purpose of this stability analysis, that no translational or rotational motion of the rigid object appears except for rotation around the y^R axis with the axis of rotation in the right-hand corner of the object as represented in Fig. 7.

The motion of the object under such a condition is defined by the system of state space equations:

where ϕ_y is the angle of rotation around the y^R axis, $\sum T_{yi}$ is the sum of all the torques that are acting on the object, and J_y^R is the inertia of the object around the y^R axis of the reference coordinate system. J_y^R is defined by Steiner's rule and is always positive.

$$J_y^R = m \cdot r^2 + J_y^K \quad (2)$$

m je masa predmeta, r je razdalja med osjo vrtenja in masnim središčem predmeta, J_y^K pa je vztrajnost predmeta okoli osi y^K .

m is the mass of the object, r is the distance between the axis of rotation and the object's center of mass, and J_y^K is the object's inertia around the y^K axis.

Ravnotežna točka sistema je definirana z enačbo:

The equilibrium point of the system is defined by equation:

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi}_y \\ \ddot{\phi}_y \end{bmatrix} = 0 \quad (3)$$

Pogoj (4) je določen z enačbama (1) in (3)

The condition (4) is determined from equations (1) and (3) and must be satisfied

$$\frac{1}{J_y^R} \sum_i T_{yi} = 0 \Rightarrow \sum_i T_{yi} = 0 ; J_y^R > 0 \quad (4)$$

in mora biti izpolnjen, ko je sistem v ravnotežni točki.

if the system is at the equilibrium point.

V potrditev, da je predmet na sliki 7 v ravnotežni točki, je raziskan pogoj (4) za stanje s slike 7.

To verify that the object in Figure 7 is at the equilibrium point the condition (4) is examined for the situation from Figure 7.

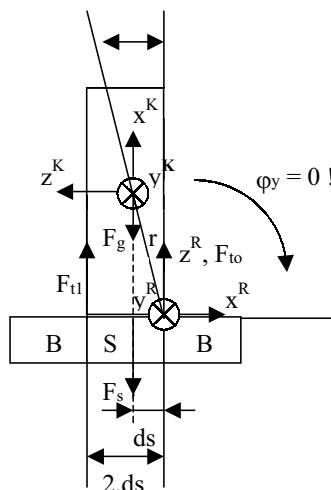
Predpostavimo enakomerno porazdelitev reakcijske sile in homogen material predmeta, vsota vrtilnih momentov $\sum T_{yi}$ je tedaj:

Assuming a uniform reactive force distribution and a homogeneous material for the object the sum of the torque $\sum T_{yi}$ is:

$$\sum_i T_{yi} = -T_g - T_s + T_t = -ds \cdot F_g - ds \cdot F_s + 2 \cdot ds \cdot F_t = -ds \cdot (F_g + F_s) + 2 \cdot ds \cdot \frac{1}{2} \cdot (F_g + F_s) = 0 \quad (5)$$

T je vrtilni moment okoli osi y^R , ki ga povzroča gravitacijska sila $F_g = m \cdot g$, delujoča na predmet. T_s je vrtilni moment okoli osi y^R , ki ga povzroča sila F_s delujoča na predmet, le ta pa se pojavi zaradi sesalnega učinka cevk, ki so prekrite s predmetom. Predpostavljamo, da deluje sila F_s v središču cevk, označenih s črko S na sliki 7. In T_t je vrtilni moment okoli osi y^R , ki ga povzročajo enakomerno porazdeljene površinske reakcijske sile F_t , delujoče na predmet, ds je polmer cevke.

T is the torque around the y^R axis produced by gravitational force $F_g = m \cdot g$ on the object. T_s is the torque around the y^R axis produced by the force F_s on the object, which appears as a result of the sucking action of the tubes where the tubes are covered by the object. It is assumed that force F_s is acting in the middle of the tube denoted by S in Figure 7. And T_t is the torque around the y^R axis produced by the uniformly distributed surface reactive force F_t on the object. ds is equal to half of the tube diameter.



Sl. 7. Predmet v navpični usmeritvi
Fig. 7. Object in the vertical orientation

Ker je pogoj (4) izpolnjen, je predmet na sliki 7 v ravnotežni legi. Za analizo stabilnosti ravnotežne točke smo uporabili metodo Ljapunova. Če je ravnotežna točka stabilna, tedaj se bo predmet vrnil v ravnotežno točko tudi, če ga zavrtimo v levo, izmaknjeno iz ravnotežne lege. Kinetično energijo rotirajočega predmeta smo izbrali kot kandidata za Ljapunovovo funkcijo (6) sistema.

Therefore, the object in Figure 7 is at the equilibrium point. To analyze the stability of the equilibrium point we used the Lyapunov method. If the equilibrium point is stable the object should return to the equilibrium point from a situation where the object is rotated out of the equilibrium point. The kinetic energy of the rotated object is chosen as a candidate Lyapunov function (6) of the system.

$$V = W_{krot} = \frac{J_y^R \cdot \dot{\phi}_y^2}{2} \geq 0 \quad (6)$$

Izbrana funkcija Ljapunova je pozitivno definitna, ker je vztrajnost predmeta J_y^R vedno pozitivna (2). Da bo sistem stabilen, mora biti odvod Ljapunovove funkcije $\dot{V}$ negativno semidefiniten.

The chosen Lyapunov function is positive definite because the term J_y^R is always positive (2). In order for the system to be stable the derivative of the Lyapunov function $\dot{V}$ must be negative semi-definite.

$$\dot{V} = \dot{\phi}_y \cdot J_y^R \cdot \ddot{\phi}_y = \dot{\phi}_y \cdot \sum_i T_{yi} \leq 0 \quad (7)$$

Oglejmo si stanje na sliki 8. Na sliki 8 je predmet zasukan za neki kot ϕ_y iz ravnotežne lege in se vrti okoli osi y^R s pozitivno hitrostjo $\dot{\phi}_y > 0$.

Now consider the situation in Figure 8. The object in Figure 8 is rotated out of the equilibrium point by an angle ϕ_y and rotates around the axis y^R with positive speed $\dot{\phi}_y > 0$.

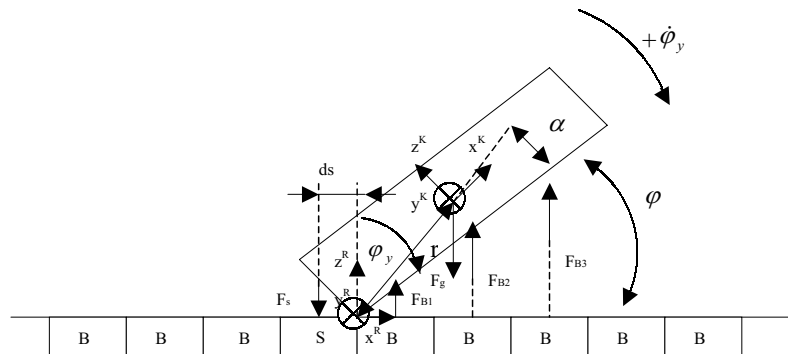
Za izvedbo analize stabilnosti moramo torej ovrednotiti vsoto vrtilnih momentov $\sum_i T_{yi}$, ki skupaj s hitrostjo $\dot{\phi}_y$ določa odvod funkcije Ljapunova. Če je $\sum_i T_{yi} \leq 0$, tedaj je navpična smer predmeta stabilna. Vsota vrtilnih momentov $\sum_i T_{yi}$ je za območje kota $0 \leq \phi_y < 90^\circ$ enaka:

Therefore, for the stability analysis the sum of the torque $\sum_i T_{yi}$ has to be evaluated. If $\sum_i T_{yi} \leq 0$ then the object is stable. The sum of torque $\sum_i T_{yi}$ for the range of $0 \leq \phi_y < 90^\circ$ is:

$$\begin{aligned} 0 \leq \phi_y < \alpha &\Rightarrow \sum_i T_{yi} = -T_g - T_s - \sum_j T_{Bj} \leq 0 \\ \alpha \leq \phi_y < 90^\circ &\Rightarrow \sum_i T_{yi} = +T_g - T_s - \sum_j T_{Bj} \end{aligned} \quad (8)$$

kjer je, enako kakor prej, T_g vrtilni moment okoli osi y^R , ki ga povzroča gravitacijska sila $F_g = m \cdot g$, delujoča na predmet, T_s je vrtilni moment okoli osi y^R , ki ga povzroča sila F_s , delujoča na predmet, le ta pa se pojavi zaradi sesalnega učinka cevok, ki so prekrile s predmetom. Vsoto vrtilnih momentov $\sum_j T_{Bj}$ okoli osi y^R ustvarjajo cevke s pihanjem zraka na predmet, ds je enak polmeru cevke.

where, as before, the torque T_g around the y^R axis is produced by gravitational force $F_g = m \cdot g$ on the object, the torque T_s around the y^R axis is produced by the force F_s due to the sucking action of the tubes on the object and the sum of the torque $\sum_j T_{Bj}$ around the y^R axis is produced by the blowing action of the tubes on the object. ds is equal to half of the tube diameter.



Sl. 8. Predmet, zasukan iz ravnotežne lege
Fig. 8. The object rotated out of the equilibrium point

Stabilnost predmeta v območju $0 \leq \varphi_y < \alpha$ pomeni področje labilne stabilnosti predmeta v navpični usmeritvi. To območje je enako območju labilne stabilnosti predmeta v navpični smeri na mizi. Na NPAP pa se zaradi sesanja in pihanja zraka iz cevk območje stabilnosti navpične smeri razširi tudi na območje $\alpha \leq \varphi_y < 90^\circ$.

Vrtilni moment, ki ga povzroča gravitacijska sila, je:

$$T_g = r \cdot \cos(\alpha + 90^\circ - \varphi_y) \cdot F_g; \quad F_g = m \cdot g \quad (9)$$

Vrtilni navor, ki ga povzroča sila F_s , zaradi sesalnega učinka cevk v vrsti, ki so prekrile s predmetom, je:

$$T_s = -ds \cdot F_s \quad (10)$$

Silo F_s lahko določimo iz:

$$F_s = -(p_{air} \cdot A_{OBT} - (p_{air} + p_s) \cdot A_{OBB}) \cdot \cos \varphi_y \quad (11)$$

kjer je A_{OBB} površina spodnje strani predmeta, p_{air} je atmosferski tlak. Predpostavljamo, da sta spodnja in zgornja stran predmeta (A_{OBB} , A_{OBT}) enaki in sta A_{OB} . Prav tako predpostavljamo, da je vrednost vakuumu nespremenljiva na spodnji strani predmeta. Vrednost $p_s < 0$ v primeru sesanja cevk. Zato lahko enačbo (11) prepišemo:

$$F_s = p_s \cdot A_{OB} \cdot \cos \varphi_y \quad (12)$$

Kakor prej, je predpostavljeno, da deluje sila F_s v središču cevk, ki sesajo. Zato je ds razdalja med središčem vrstice cevk, ki sesajo in osjo y^R . F_{Bj} je sila, ki nastane zaradi pihanja zraka skozi cevke v j-ti vrstici pod desno stranjo predmeta. Vrtilni navor T_{Bj} okoli osi y^R povzroča sila F_{Bj} .

$$T_{Bj} = -ds \cdot F_{Bj}; \quad F_{Bj} = p_B \cdot A_{Orij} \cdot \cos \varphi = p_B \cdot A_{Orij} \cdot \cos(90^\circ - \varphi_y) \quad (13)$$

Vrednost $p_B > 0$ v primeru pihanja cevk in A_{Orij} je j-ti del površine desne strani predmeta,

The stability of the object in the range $0 \leq \varphi_y < \alpha$ represents the labile stability range of the object as would be the case for the same object on a table. On the PASD the torque due to the sucking and blowing actions of the tubes on the object results in an increase in the stability range into the region $\alpha \leq \varphi_y < 90^\circ$.

The torque produced by gravitational force is:

The torque produced by the force F_s due to the sucking action of the tubes in a row that is beneath the bottom side of the object is:

The force F_s can be calculated as:

where A_{OBB} is the surface of the bottom side of the object and p_{air} is the atmospheric pressure. It is assumed that the bottom and the top (A_{OBB} , A_{OBT}) surfaces of the object are the same and are equal to A_{OB} . It is also assumed that the vacuum value p_s is constant on the bottom surface of the object. The value is $p_s < 0$ for the sucking action. So, the equation (11) could be rewritten:

As before, it is assumed that force F_s is acting in the middle of the row of sucking tubes. Therefore, ds is the distance between the middle of the row of sucking tubes and the axis y^R . F_{Bj} is the force produced by the blowing action of the tubes in the j-th row that is beneath the right-hand side of the object. The torque T_{Bj} around the y^R axis is produced by the force F_{Bj} .

The value $p_B > 0$ for the blowing action and A_{Orij} is the j-th part of the surface of the right-hand

ki bi pokrival cevke, če bi predmet ležal vodoravno. Predpostavljamo, da deluje sila F_{Bj} v središču cevk. Zato je razdalja med osjo y^R središčem j -te cevk enaka $(j-1/2) \cdot d_t$, kjer je d_t premer cevk NPAP.

Vsota vrtilnih momentov, ki delujejo na predmet, je tako:

$$\sum_i T_{yi} = T_g - T_s - \sum_j T_{Bj} = m \cdot g \cdot r \cdot \cos(90^\circ + \alpha - \varphi_y) - \frac{1}{2} \cdot d_t \cdot p_s \cdot A_{OB} \cdot \cos \varphi_y - \sum_j (j - \frac{1}{2}) \cdot d_t \cdot p_B \cdot A_{ORj} \cdot \cos(90^\circ - \varphi_y) \quad (14)$$

V območju $\alpha \leq \varphi_y < 90^\circ$ so vse tri trigonometrične funkcije: $\cos(90^\circ + \alpha - \varphi_y)$, $\cos(\varphi_y)$ in $\cos(90^\circ - \varphi_y)$ iz enačbe (14) pozitivne. Zato vrtilni moment, ki nastaja zaradi sesanja in pihanja cevk nasprotuje vrtilnemu momentu, ki ga povzroča sila teže F_g . Z dovolj visoko nastavitvijo vrednosti tlaka sesanja in pihanja NPAP lahko zagotovimo:

$$\sum_i T_{yi} \leq 0 \quad (15)$$

za vse $\alpha \leq \varphi_y < 90^\circ$. In stabilnost navpične smeri predmeta je zagotovljena.

Če se zavrti predmet iz ravnotežne lege z usmeritvijo proti desni $\dot{\varphi}_y > 0$, kakor je prikazano na sliki 8, tedaj je odvod Ljapunove funkcije $\dot{V} = \dot{\varphi}_y \cdot \sum_i T_{yi} \leq 0$, ker je $\dot{\varphi}_y > 0$ in $\sum_i T_{yi} \leq 0$. Z enako metodo Ljapunova in podobnimi enačbami, ki so prej opisane, je mogoče dokazati tudi stabilnost predmeta, ki ga zavrtimo iz ravnotežne lege v levo. To pomeni, da je navpična usmeritev predmeta stabilna.

Potencialno polje tlaka je lahko neskončno visoko in nespremenljivo (laminarni zračni tok) v teoriji, ne pa tudi v praksi. Zato velja ta analiza stabilnosti le za predmete v navpični usmeritvi, katerih višina ne presega višine laminarnega zračnega toka, ki ga ustvarja potencialno polje tlaka NPAP. Zaradi dejanske ureditve cevk NPAP (kjer cevke niso urejene v ravne vrstice po smeri y) je potreben za doseg enake stabilnosti nekoliko višji tlak. Zaradi povečane stabilnosti usmeritve predmeta je med gibanjem predmeta zagotovljena robustnost na spremembe usmeritve predmeta med razklenjenim krmiljenjem.

3 SKLEP

Ta prispevek prikazuje načrtovanje prototipa naprave s pnevmatično aktivno površino, njene potencialne uporabe in osnove gibanja objekta v zračnem toku, ki ga povzroči aktivna površina. Naslednja pomembna razlaga, ki je opisana v prispevku, je analiza stabilnosti po Ljapunovu za tog objekt v navpični usmeritvi, ki prikazuje povečano stabilnost objekta na NPAP zaradi zračnega toka aktivne površine.

side of the object covering the tubes of the PASD if the object would be in the horizontal orientation. It is assumed, again, that the F_{Bj} force is acting in the middle of the tubes. Therefore, the distance between the y^R axis and the middle of the j -th tube is $(j-1/2) \cdot d_t$, where d_t is the diameter of the tube of the PASD.

The sum of the torque acting on the object is:

In the range $\alpha \leq \varphi_y < 90^\circ$ all three trigonometric cosine functions: $\cos(90^\circ + \alpha - \varphi_y)$, $\cos(\varphi_y)$ and $\cos(90^\circ - \varphi_y)$ from equation (14) are positive. Therefore, the torque due to the sucking or blowing actions counteracts the gravity torque produced by the gravity force F_g . With a high enough level of adjustment of the blowing and sucking pressure of the PASD we can achieve:

for all $\alpha \leq \varphi_y < 90^\circ$. And the stability of the vertical object's orientation is ensured.

If the object comes out of the equilibrium region with rotation to the right $\dot{\varphi}_y > 0$ as shown in Figure 8 then the derivative of the Lyapunov function $\dot{V} = \dot{\varphi}_y \cdot \sum_i T_{yi} \leq 0$ since $\dot{\varphi}_y > 0$ and $\sum_i T_{yi} \leq 0$. The same Lyapunov method, with practically the same equation development as previously described, can be used to prove stability if the object comes out of the equilibrium point to the left. It means that the considered equilibrium point (vertical orientation) is stable.

The pressure potential field could be infinitely high and constant (laminar air-flow) in theory, but this is not possible in practice. Therefore, this stability analysis has practical value only for objects in the vertical orientation with a height that does not exceed the height of the laminar air-flow produced by the pressure potential field of the PASD. The actual arrangement of tubes for the PASD (the tubes are not in straight columns in the y direction) due to non-idealities means we need a slightly higher pressure to achieve the same stability. With the increased stability of the object orientation during step-by-step motion the robustness in terms of object orientation changes during the open-loop control is ensured.

3 CONCLUSION

This paper presents a prototype design of a PASD, its potential applications, and the basics of how an object is moved in the airflow caused by an active surface. The next important explanation is a Lyapunov-based stability analysis of a rigid object in the vertical orientation, which showed increased stability of the objects on the PASD due to the airflow of the active surface.

Zahvala

Projekt razvoja prototipne naprave NPAP je bil med drugim financiran tudi iz programa Fulbright-ovih štipendij in je bil izveden v Laboratorijih centra za avtomatizacijo tehnologij, New York center naprednih tehnologij, Rensselaer Polytechnic Institute. Avtorji prispevka bi se radi posebej zahvalili vsemu osebju, ki je kakor koli prispevalo razvoju NPAP v Center for Automation Technology, posebej prof. Hary-ju Stephanou in Ben-u Potsaid-u.

Acknowledgment

This project is also funded under the Fulbright Scholar Program and was developed in the laboratories of the Center for Automation Technologies, New York State Center for Advanced Technology, Rensselaer Polytechnic Institute. The authors of the paper would like to thank all involved personnel in the Center for Automation Technologies, especially to Ben Potsaid and Harry Stephanou.

4 LITERATURA

4 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., Tsao, T., Will, P., Tai, Y., Liu, W.: 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.

Naslovi 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

dr. Tobias Winther
Center for Automation
Technologies
Rensselaer Polytechnic Institute
110 8th Street, CII 8015, Troy
New York 12180-3590, USA
winther@cat.rpi.edu

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

Dr. Tobias Winther
Center for Automation
Technologies
Rensselaer Polytechnic Institute
110 8th Street, CII 8015, Troy
New York 12180-3590, USA
winther@cat.rpi.edu

Prejeto: 8.5.2001
Received:

Sprejeto: 23.5.2002
Accepted:

Projektna naloga kot strategija vzgojno-izobraževalnega dela

The Project Task as a Strategy for Education-Training Activities

Amand Papotnik

Prispevek obravnava projektno nalogo kot strategijo vzgojno-izobraževalnega dela, ki je organizirana od idejne zasnove prek izdelave prototipa, tehnične in tehnološke dokumentacije, izvedbe serijske proizvodnje do analize dela in ovrednotenja izdelka – projekta. Pri taki nalogi lahko sodelujejo učenci več vzporednih oddelkov ali različnih razredov, pri čemer gre lahko za delitev dela med razredi.

Projektna naloga je tista strategija vzgojno-izobraževalnega dela, pri kateri gre za razvoj različnega mišljenja, ustvarjalnih sposobnosti, pridobivanja, poglobljanja, utrjevanja in uporabe znanja s področja tehnike, tehnologije, organizacije dela, ekonomike, ergonomije, ekologije, informatike in računalništva, industrijskega oblikovanja itn.

© 2002 Strojniški vestnik. Vse pravice pridržane.

(Ključne besede: delo vzgojnoizobraževalno, strategije dela, naloge projektne, reševanje problemov, mišljenje divergentno)

This paper deals with the project task as a strategy for education-training activities. The project task is organised as follows: it begins with the conception, and then continues through prototype, technical and technological documentation, execution of series production and on to analysis of the work and evaluation of the product-project. In such a task the pupils of several classes or different classes can cooperate so that the work is divided among the classes.

The project task is a strategy of education-training activities including the development of divergent thinking, creative capacities, acquiring, developing, exercising and applying knowledge in the areas of technology, production planning, economics, ergonomics, ecology, information processing and computer science, industrial design, etc.

© 2002 Journal of Mechanical Engineering. All rights reserved.

(Keywords: education-training, strategy of activities, project tasks, problem solving, divergent thinking)

0 UVODNE MISLI

Tehnična vzgoja (tehnika in tehnologija) omogoča učencu spoznati, kako človek spreminja naravo z namenom, da preživi; kako uporablja tehniko in tehnologijo in informacijska znanja. "Ta predmet ima izredno velik vpliv na razvoj spoznavnih, čustvenih, gibalnih in socialnih potreb učenca, ki jih lahko udejanja le v stiku s tehniko in tehnologijo. Njen pomen je povezan s potrebami družbe, ki mora v sodobnih razmerah skrbeti za svoj obstoj. To bo lahko uresničevala s tehnološkim napredkom na vseh področjih, kar ji bo omogočilo, da se bo lahko enakopravno vključevala v evropske tokove in bo primerljiva z razvitim svetom." [7]

"Poudariti moramo, da je tehnična vzgoja v pravem pomenu vzgojni in prav tako tudi izobraževalni predmet, čeprav v nobenem primeru ne mislimo

zmanjševati pomena, ki ga dajemo predmetu kot vzgojnemu, usmerjevalnemu, oblikovalnemu predmetu. Nasprotno, predmet je vzgojno-izobraževalen." [3].

Pri tehnični vzgoji (tehnika, tehnologija) vse bolj prihaja do večje izobraževalne vrednosti, z bolj zahtevnimi vsebinami, metodami in postopki v okviru projektne naloge kot posebne strategije vzgojno-izobraževalnega dela s poudarjeno možnostjo korelacije, integracije, kooperacije, prenosa znanja, diferenciacije in individualizacije.

V tem prispevku bom posebej poudaril projektno nalogo, pri kateri naj bo čim manj "reproduktivne aktivnosti ali dela po nareku, ki nima veliko skupnega z ustvarjalno tehnično aktivnostjo in problemskim načinom vodenja razvoja divergentnega mišljenja" [5], in prav pri projektni nalogi učencev na nevsiljiv, ustvarjal in prijazen način vstopa v svet tehnike in tehnologije.

1 PREDSTAVITEV PROJEKTNE NALOGE

Projektna naloga je organizirana “od idejne zasnove prek izdelave prototipa, tehnične in tehnološke dokumentacije, izvedbe serijske proizvodnje do analize dela in ovrednotenja izdelka-projekta” [4].

Projektna naloga lahko sestoji iz sedmih učnih enot. Potek učnih enot je naslednji:

1. načrtovanje in razvoj izdelka,
2. izdelava prototipa,
3. konstruiranje (izdelava tehnične in tehnološke dokumentacije),
4. priprava serijske proizvodnje,
5. ekskurzija,
6. izvedba proizvodnjega dela na tekočem traku,
7. konec proizvodnega dela [5].

Pri taki nalogi lahko sodelujejo učenci več vzporednih oddelkov ali različnih razredov, pri čemer gre lahko za delitev dela med razredi. Izvajanje sestavin projektne naloge v posameznih razredih izhaja iz mrežnega načrta dejavnosti, ki jih postavimo v uvodnih učnih urah, pri katerih razvijamo idejo za projektno nalogo.

V tem delu predstavimo tematiko, nato pa učenci predlagajo mogoče rešitve, ki naj se nanašajo

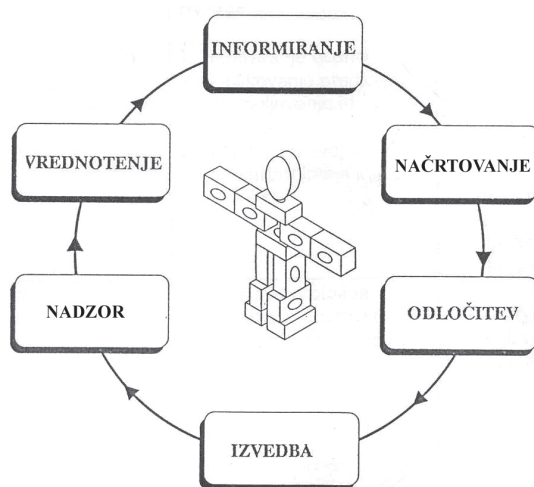
na celotni postopek, in sicer rešitve **od zamisli do izdelka**.

Ta krog “**model vseh dogajanj**” [8] je sestavljen iz naslednjih stopenj oziroma dogajanj: **informiranje, načrtovanje, odločitev, izvedba, nadzor, vrednotenje**.

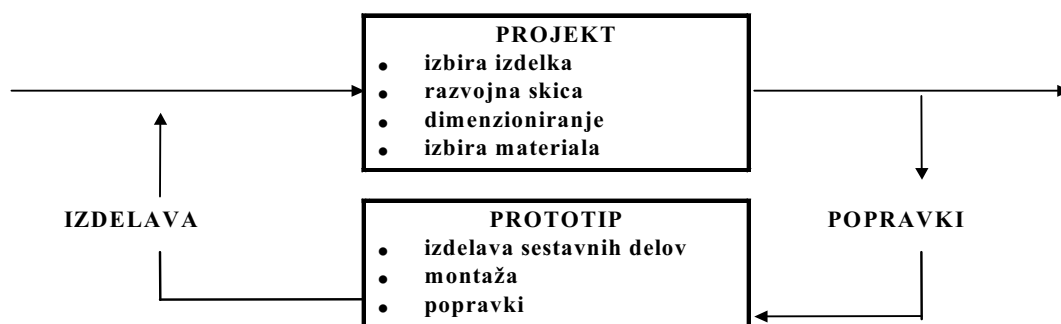
Iz grafičnega prikaza je razvidno, da so vse dejavnosti tega modela tokrat osredotočene na primer robota, ki ga lahko zgradimo s sestavljankami (npr.: sistem gradnikov Legodacta) ali z obdelovanjem, oblikovanjem, preoblikovanjem gradiv (npr.: iz kartona, lepenke, odpadne embalaže, umetnih snovi itn.).

Projektno nalogo je treba pojmovati kot možen primer, pri čemer je izdelek le izrazno sredstvo in se lahko prilagaja katalogom znanja, izobraževalnim programom, interesom, sposobnostim učencev itn. Predstavljeno projektno nalogo je treba razumeti kot strategijo vzgojno-izobraževalnega dela in na tej podlagi izoblikovati priprave na vzgojno-izobraževalno delo.

Projektne naloge je po tej metodologiji mogoče uspešno izvajati v osnovni šoli (na razredni in predmetni stopnji), pri praktičnem pouku v srednjem poklicnem in srednjem tehničnem izobraževanju, pri strokovnoteoretičnih predmetih v različnih programih srednješolskega izobraževanja.



Sl. 1. Model vseh dogajanj



Sl. 2. Miselni vzorec: Od prototipa do končne podobe projekta (izdelka)

Preglednica 1. Naloge, vzgojno-izobraževalni in psihomotorični cilji pri projektni nalogi

Ura	Učna enota	Naloge	Vzgojno-izobraževalni in psihomotorični cilji
1	Načrtovanje in razvoj izdelka	- Motiviranje učencev. - Oblikovanje predlogov, utemeljevanje in odločitve. - Izdelava razvojne skice, dimenzioniranje in izbira gradiva.	- Učenci se znajo odločiti za uporaben izdelek in narisati razvojno skico. - Izdelek znajo dimenzionirati. - Znajo izbirati primerno gradivo za izdelavo izdelka. - Navajajo se na skupinsko delo.
2	Izdelava prototipa	- Izdelava prototipa, analiza in popravki. - Vnašanje popravkov v projekt.	- Uvidijo in razumejo vlogo prototipa v proizvodnji. - Obvladajo delovne operacije, ki so potrebne za izdelavo. - Spoznajo nevarnosti pri delu in pomen uporabe zaščitnih sredstev.
3	Konstruiranje	Izdelava sestavne risbe, delavniške risbe in kosovnice.	Z uporabo skice in prototipa zmorejo natančno narisati sestavno in delavniško risbo in izpolniti kosovnico.
4	Priprava serijske proizvodnje	- Priprava tehnološkega lista. - Priprava šablon, organizacija sistema delovnih mest, priprava na ekskurzijo.	- Spoznajo tehnološki list, razumejo njegov pomen in ga znajo smiselno izpolniti. - Razumejo pomen šablone za serijsko proizvodnjo. - Znajo organizirati delovna mesta za serijsko proizvodnjo.
5	Ekskurzija	- Ogled serijske proizvodnje. - Zbiranje podatkov o tehnološki dokumentaciji in organizaciji delovnega postopka. - Vnašanje novih spoznanj v naše proizvodno delo.	- Uvidijo pomen delitve dela in serijske proizvodnje. - Pridobijo spoznanja o pomenu tehnološke dokumentacije, organizacije delovnih mest in notranjega transporta.
6	Izvedba proizvodnega dela (po tekočem traku)	- Normiranje delovnih mest in določitev števila učencev na posameznem delovnem mestu. - Upoštevanje pravil o varnem delu, uporaba zaščitnih sredstev. - Izdelava sestavnih delov, montaža in medfazni nadzor. - Površinska obdelava in zaščita.	- Zavestno izpolnjujejo varnostne predpise in uporabljajo zaščitna sredstva. - Pravilno opravljajo delovne operacije, postopke in naloge. - Pridobivajo si znanja, ustvarjalne sposobnosti, ročne spretnosti in delovne navade.
7	Konec proizvodnega dela	- Konec izdelave. - Končno preverjanje kakovosti in preskušanje. - Izračun proizvodnih stroškov. - Izračun vrednosti izdelka. - Primerjava šolske in tovarniške proizvodnje.	- Znajo primerjati uspešnost svojega dela z delom delavcev v proizvodnji. - Vrednotijo porabo gradiv, energije, obrabo strojev in naprav ter učiteljevo vloženo delo. - Spoznajo postopek za izračun vrednosti izdelka.

Projektni način dela je mogoče uveljaviti tudi pri projektnih dnevih, tehniških dnevih, raziskovalnih in poletnih šolah.

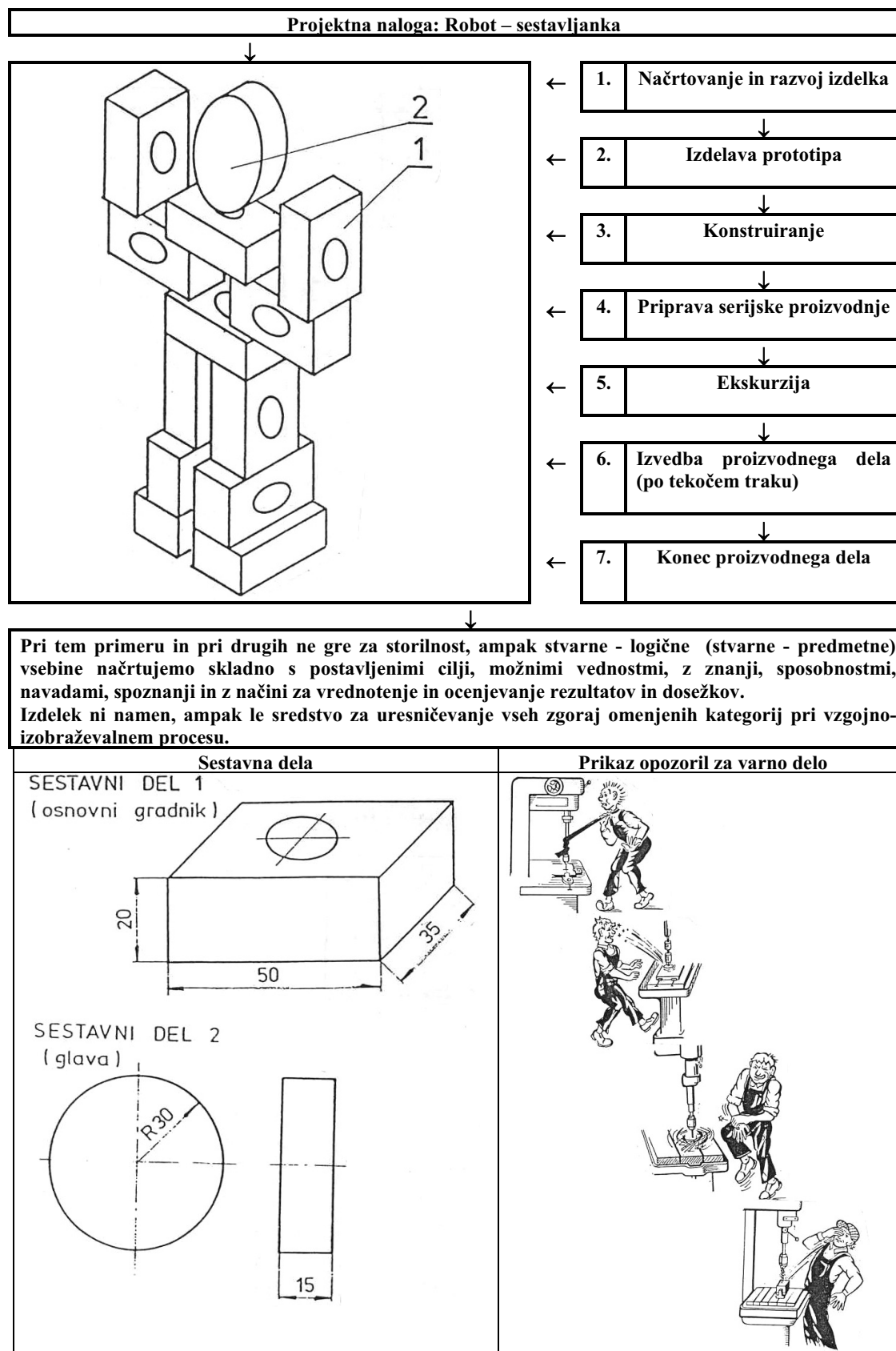
1.1 Od prototipa do končne podobe projekta (izdelka)

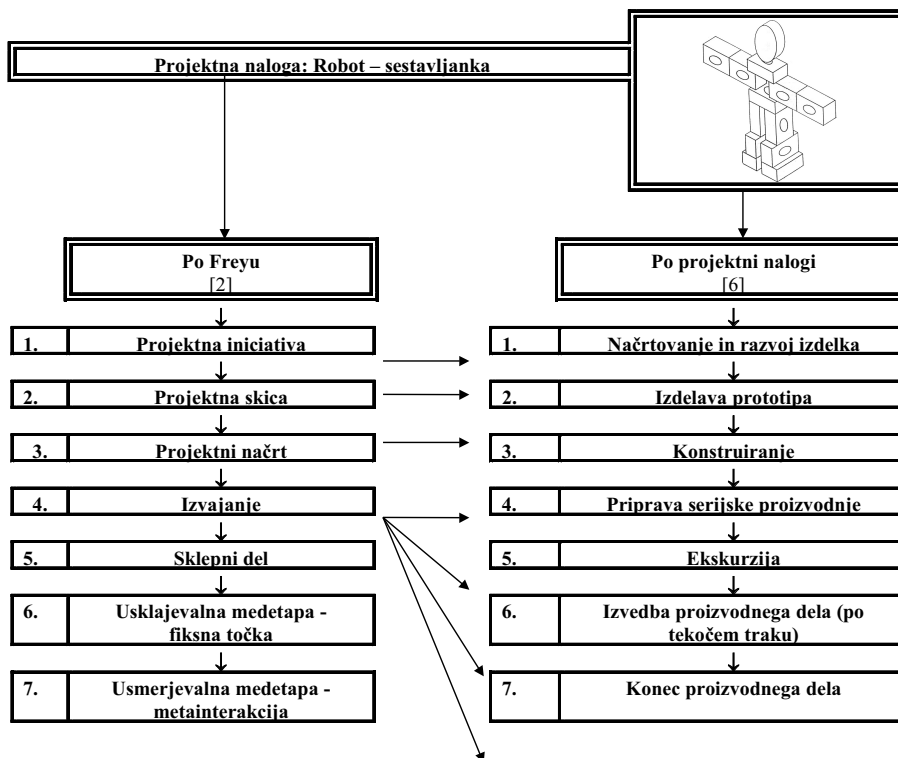
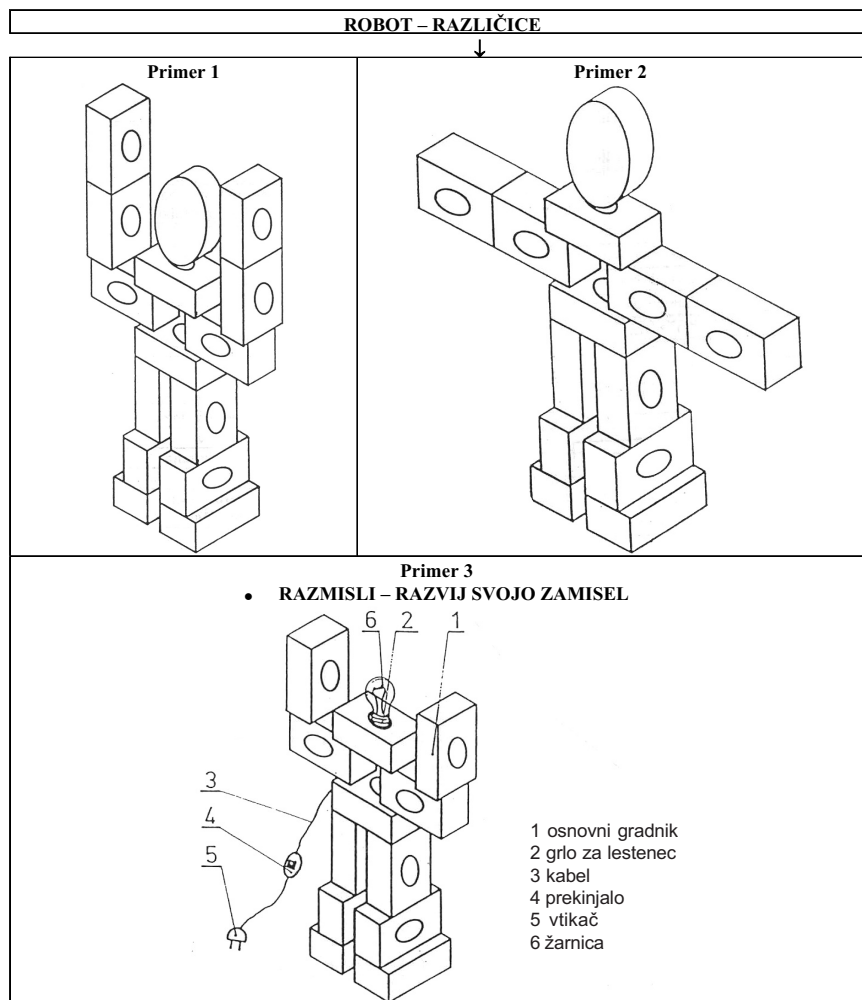
Iz miselnega vzorca je razvidno, da ustvarjalne

in miselne dejavnosti izhajajo iz izdelave prototipa (prvi izdelek), ki ga nato popravimo, dopolnimo in izboljšamo in šele potem preidemo k izdelovanju (izdelka) projektne naloge.

V preglednici 2 si bomo ogledali razporeditev vzgojno-izobraževalnih enot pri primeru robota.

Preglednica 2. Razporeditev vzgojno-izobraževalnih enot pri primeru robota





Sl. 3. Miselni vzorec: Primerjava artikulacij

1.2 Primerjava artikulacij

Iz miselnega vzorca: **Primerjava komponent projektne naloge z artikulacijo po Freyu** je mogoče razbrati, da imata obe metodologiji precej podobnih komponent.

Ugotovimo lahko naslednje:

- artikulacija po Freyu je splošnejša,
- projektna naloga je prav tako tudi splošno uporabna in zelo primerna za tehnično in tehnološko področje,
- uporabna je pri osnovah tehnične vzgoje (tehnike in tehnologije) na razredni stopnji,
- izredno primerna je pri pouku tehnične vzgoje v osnovni šoli (tehnike in tehnologije), pri strokovno-teoretičnih premetih različnih usmeritev v srednji poklicni in tehnični šoli in pri praktičnem pouku v vseh programih in usmeritvah srednjega poklicnega in tehničnega izobraževanja,
- od učiteljeve iznajdljivosti, znanja in didaktične usposobljenosti je odvisno, kako bo znal teoretična izhodišča prilagoditi in usmeriti v pravo in uspešno smer.

2 NAMESTO SKLEPA

Projektna naloga je tista strategija vzgojno-izobraževalnega dela, pri kateri gre za razvoj različnega mišljenja, ustvarjalnih sposobnosti, pridobivanja, poglobljanja, urejevanja in uporabe znanja s področja tehnike, tehnologije, organizacije dela, ekonomike, ergonomije, ekologije, informatike in računalništva, industrijskega oblikovanja itn.

Pri učnih urah, ki gradijo projektno nalogo, je treba pobude in motive za ravnanje primerjati s potrebami, interesi, sposobnostmi in nagnjenji učencev ter tako ustvarjati ustrezen, kakovosten in prijazen vzgojno-izobraževalni postopek.

Ob sklepu pa še misel iz knjige Učenje: skriti zaklad, ki opozarja na pomen znanosti in tehnologije in enopomensko opozarja na potrebo in nujno po navzočnosti tehnike in tehnologije v predmetnikih (tudi osnovne šole) ter končuje takole: "Če ne bomo posvetili tej nalogi izjemnih naporov, bodo dežele, ki jim manjka osnove za vključitev v mednarodno tehnološko tekmovanje, postale območja revščine, obupa in nasilja, česar se ne bo dalo odpraviti s pomočjo ali humanitarnimi dejavnostmi" [1].

3 LITERATURA

- [1] Delors, J. (1996) Učenje: Skriti zaklad; Poročilo Mednarodne komisije o izobraževanju za enaindvajseto stoletje, Pripravljeno za UNESCO, Ministrstvo za šolstvo in šport, Republika Slovenija, Ljubljana.
- [2] Hänsel, D. (1995) Das Projektbuch Grundschule, *Belz Verlag*, Weinheim; Basel.
- [3] Papotnik, A. (1988) Specialna didaktika in metodologija tehnične vzgoje, *Zveza organizacij za tehnično kulturo Slovenije*, Ljubljana.
- [4] Papotnik, A. (1991) Prispevki k didaktiki tehnične vzgoje za razredno stopnjo, *Pedagoška fakulteta Maribor*, Maribor.
- [5] Papotnik, A. (1992) Prvi koraki v projektno nalogo, *Didakta*, Radovljica.
- [6] Papotnik, A. (1998) S projektno nalogo do boljšega znanja, *Ozolit*, Trzin.
- [7] Papotnik, A., B. Aberšek, F. Florjančič (1996) Zaustavimo izganjanje tehnične vzgoje iz predmetnika devetletne osnovne šole, *Republika*, Ljubljana.
- [8] Rottluff, J. (1992) Selbständig lernen; Arbeiten mit Leittexten; *Belz Verlag*; Weinheim und Basel.

Avtorjev naslov: prof.dr. Amand Papotnik
Univerza v Mariboru
Pedagoška fakulteta
Koroška cesta 160
2000 Maribor

Prejeto: 8.1.2002
Received:

Sprejeto: 23.5.2002
Accepted:

Osebnosti vesti

Personal Events

Razpis za glavnega in odgovornega urednika Strojniškega vestnika

STROJNIŠKI VESTNIK

Univerza v Ljubljani - Fakulteta za strojništvo, Univerza v Mariboru - Fakulteta za strojništvo,
Zveza strojnih inženirjev in tehnikov Slovenije, GZS - Združenje kovinske industrije

objavlja razpis

GLAVNEGA IN ODGOVORNEGA UREDNIKA

Pogoji:

- uveljavljenost na znanstvenem in strokovnem področju strojništva,
- poznavanje izdajateljskih postopkov,
- izkušnje pri podobnih delih.

Funkcija glavnega in odgovornega urednika Strojniškega vestnika se razpisuje za dobo 5 let. Kandidati naj prijavijo priložijo svoj uredniški program in načrt dela ter predlagajo svojega namestnika - tehničnega urednika.

Vloge pošljite na naslov Strojniški vestnik, Fakulteta za strojništvo, Aškerčeva 6, 1000 Ljubljana (v zaprti kuverti z dobro vidno oznako RAZPIS) do 30.10.2002. Vse dodatne informacije dobite na telefonski številki 01/4771-124 (Suzana Domjan) ali po elektronski pošti strojniski.vestnik@fs.uni-lj.si.

Doktorati, diplome

DOKTORATI

Na Fakulteti za strojništvo Univerze v Ljubljani je dne 24. aprila 2002 mag. Samuel Rodman z uspehom zagovarjal svojo doktorsko disertacijo z naslovom: "Raziskave turbulentnih struktur radialnega vtoka olja v ozek vodoravni kanal".

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

DIPLOMIRALI SO

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

dne 26. aprila 2002: Dejan BOLTAR, Peter NOSE, Primož ZAJC;

dne 29. aprila 2002: Boštjan JURIŠEVIČ, Primož MIHALIČ, Henri ORBANIČ, Andrej PODNAR.

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

dne 25. aprila 2002: Nina ČIŽIČ.

*

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

dne 11. aprila 2002: Toni BITENC, Marko BUTARA, Sebastjan JELEN, Gorazd JELERČIČ;

dne 12. aprila 2002: Dejan KOVAČIČ, Livio MARAŽ, Boštjan ŠKVARČ, Robert VERTNIK, Matija ŽNIDARŠIČ;

dne 15. aprila 2002: Peter BAČAR, Vilim BRAJKOVIČ, Jože LAMOVŠEK, Albert MALNARIČ, Franci PAPEŽ, Primož PLANOVŠEK;

dne 24. aprila 2002: Miodrag DIMITRIJEVIČ, Iztok KAVŠEK, Jožef KOVAČIČ, Sebastjan RAMŠAK, Andrej VOGGRIN.

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

dne 25. aprila 2002: Leopold BRGLEZ, Gregor CVET, Marko JURIČ, Alojz MEŠIČEK, Mirko MEŽA, Enes RAKOVIČ, Andrej VALEK, Stanko VEDLIN.

*

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

dne 11. aprila 2002: Boštjan RANT.

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

dne 25. aprila 2002: Simon KUŽNER.

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 preprostejše bralčevo razumevanje, združeni v eno poglavje.)
- Sklepi, v katerih naj bo prikazan en ali več sklepov, ki izhajajo iz rezultatov in razprave.
- Literatura, ki mora biti v besedilu oštevilčena zaporedno in označena z oglatimi oklepaji [1] ter na koncu članka zbrana v seznamu literature. Vse opombe naj bodo označene z uporabo dvignjene številke¹.

Oblika članka

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

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

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

Enote in okrajšave

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

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

Papers submitted for publication should comprise:

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

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

The format of the paper

The paper should be written in the following format:

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

The layout of the text

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

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

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

Units and abbreviations

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

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

Slike

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

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

Podatki o avtorjih

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

Sprejem člankov in avtorske pravice

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

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

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: strojnistki.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] Tarnig, 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: strojnistki.vestnik@fs.uni-lj.si