

**STROJNIŠKI****VESTNIK 3**

JOURNAL OF MECHANICAL ENGINEERING

strani - pages 145 - 192

ISSN 0039-2480 . Stroj V . STJVAX

cena 800 SIT

1. Možnosti uporabe trdih prevlek na preoblikovalnih orodjih  
Wear And Friction Properties Of Hard Coatings For Forming Tools
2. "Šest sigm" v razvoju postopka izdelave  
Six Sigma in Process Design
3. Krmiljenje hladilnih sistemov  
Control in Refrigeration Systems
4. Meritev izkoristka in nastavitve krmilnih parametrov kaplanove turbine z dolgim cevnim sistemom s primerjalno metodo  
Measurement of Relative Turbine Efficiency and Adjustment of Governing Parameters on Long Penstock Kaplan Turbine with Comparative Method



## Vsebina

### Contents

Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering  
letnik - volume 50, (2004), številka - number 3

#### Razprave

- Podgornik, B., Hogmark, S., Sandberg, O.:  
Možnosti uporabe trdih prevlek na  
preoblikovalnih orodjih 146
- Pavletić, D., Fakin, S., Soković, M.: "Šest sigm" v  
razvoju postopka izdelave 157
- Primožič, J., Svečko, R.: Krmiljenje hladilnih  
sistemov 168
- Trebše, A. J.: Meritev izkoristka in nastavitvev  
krmilnih parametrov kaplanove turbine z dolgim  
cevnim sistemom s primerjalno metodo 181

#### Osebnosti

#### Navodila avtorjem

#### Papers

- Podgornik, B., Hogmark, S., Sandberg, O.: Wear And  
Friction Properties Of Hard Coatings For  
Forming Tools 146
- Pavletić, D., Fakin, S., Soković, M.: Six Sigma in  
Process Design 157
- Primožič, J., Svečko, R.: Control in Refrigeration  
Systems 168
- Trebše, A. J.: Measurement of Relative Turbine Efficiency  
and Adjustment of Governing Parameters on Long  
Penstock Kaplan Turbine with Comparative Method 181

#### 190 Personal Events

#### 191 Instructions for Authors

## Možnosti uporabe trdih prevlek na preoblikovalnih orodjih

### Wear And Friction Properties Of Hard Coatings For Forming Tools

Bojan Podgornik - Sture Hogmark - Odd Sandberg

*Namen predstavljenega prispevka je bil raziskati možnosti uporabe trdih prevlek fizikalno nanešenih v vakuumu (FNV - PVD) na orodjih za hladno preoblikovanje. V raziskavo so bile vključene prevleke TiN, TiB<sub>2</sub>, TaC in diamantu podobna prevleka na podlagi trdega ogljika (DPP), katerih tribološke lastnosti smo primerjali z različnimi orodnimi jekli za delo v hladnem jeklarne Uddeholm Tooling iz Švedske. Tribološke lastnosti materialov, vključenih v raziskavo, smo določili na preizkuševališču, katerega izoblikovanost omogoča izmenično in zvezno povečevanje ter zmanjševanje obremenitve med drsenjem. Obremenitev je bila v območju med 100 in 1300 N (kontaktni tlak med 1 GPa in 5 GPa), kot protimaterial pa smo uporabili avstenitno jeklo.*

*Rezultati raziskave kažejo, da uporaba ustrezne prevleke privede do povečane obrabne obstojnosti orodja ter do precejšnjega zmanjšanja pojava lepljenja obdelovanega materiala na površino orodja.*

© 2004 Strojniški vestnik. Vse pravice pridržane.

**(Ključne besede: preoblikovanje hladno, prevleke trde, adhezija, obraba, trenje)**

*The aim of this paper was to investigate the potential of using hard physical vapour deposition (PVD) coatings on forming tools. A tribological evaluation of TiN, TiB<sub>2</sub>, TaC and diamond like coating (DLC) coatings deposited on cold-worked tool steel was carried out in a load-scanning test rig and compared to the behaviour of different uncoated forming tool steels. The special test configuration, where austenitic stainless steel was used as the counter-material, makes it possible to gradually increase the normal load during forward sliding strokes, and to correspondingly decrease the load during reversed ones. In this investigation, the load range was 100 to 1300 N (contact pressure from 1 to 5 GPa).*

*The experimental results indicate that the introduction of an appropriate hard coating will lead to an improved wear resistance and a longer lifetime for the forming tool. Furthermore, by using hard low-friction coatings excellent anti-sticking properties can be obtained.*

© 2004 Journal of Mechanical Engineering. All rights reserved.

**(Keywords: cold forming, hard coatings, adhesion, wear, friction)**

#### 0 UVOD

V predelovalni industriji se trde zaščitne prevleke že vsakodnevno uporabljajo za povečanje obstojnosti in produktivnosti odrezovalnih orodij [1]. Zahteve po delu v agresivnih okoljih in vedno večje zahteve po oksidacijski ter obrabni obstojnosti orodij narekujejo nenehen razvoj na področju trdih zaščitnih prevlek [2]. Kljub vsemu pa v predelovalni industriji še vedno prevladuje prevleka TiN, ki je bila razvita že pred več kot dvema desetletjema.

V nasprotju z odrezovalnimi orodji je uporaba trdih prevlek pri preoblikovalnih orodjih še vedno redkost. Večina preoblikovalnih orodij je velikih izmer in zahtevne geometrijske oblike, kar otežuje nanos trdih prevlek ter doseganje ustreznosti

#### 0 INTRODUCTION

Hard and corrosion-resistant coatings are frequently used to protect and enhance the lifetimes of tools under high and constant wear loads [1]. Although introduced more than two decades ago, TiN still dominates among the hard coatings applied in industry. However, the requirements to withstand aggressive environments and to improve oxidation resistance and wear resistance under extreme conditions has led to the development and introduction of new coatings [2].

In contrast to cutting tools, the majority of forming tools is still uncoated. This is due to their larger size and the complex shape of most forming tools, which makes it difficult to apply a coating and to obtain good adhesion between the coating and the substrate material [3]. Although hard ceramic coatings are routinely

oprijemljivosti le-teh [3]. Kljub temu, da tudi pri odrezovalnih orodjih luščenje prevleke ni zaželeno [4], to ni kritično. V primeru preoblikovalnih orodij lahko delci odlučene prevleke zaidejo v stik, s čimer poslabšajo kakovost izdelka, po drugi strani pa lahko privedejo tudi do kritične poškodbe izredno dragega orodja. Seveda obstajajo še drugi razlogi, zakaj se trde prevleke v preoblikovalni industriji ne uporabljajo bolj pogosto. Eden od najpomembnejših je razmeroma visok koeficient trenja komercialnih trdih keramičnih prevlek [1], ki povzroči lepljenje obdelovanega materiala na površino orodja [5]. V zadnjih nekaj letih pa je bil narejen izjemen napredek tako na področju nanašanja trdih prevlek, kakor tudi pri razvoju prevlek na osnovi trdega ogljika z izjemnimi tornimi lastnostmi ([6] do [9]).

Namen predstavljene raziskave je bil preučiti možnosti uporabe trdih prevlek, nanesenih z metodo fizikalnega nanašanja iz parne faze (FNV), na orodjih za hladno preoblikovanje. Obrabno in torni obnašanje prevlek TiN, TiB<sub>2</sub>, TaC in DPP pri preoblikovanju avstenitnega jekla smo primerjali z lastnostmi orodnih jekel za delo v hladnem jeklarne Uddeholm Tooling iz Švedske.

## 1 EKSPERIMENTALNI DEL

V predstavljeno raziskavo so bile vključene prevleke TiN, TiB<sub>2</sub>, TaC in prevleka na osnovi trdega ogljika (DPP), ki so bile nanesene na kaljeno in popuščeno orodno jeklo za delo v hladnem vanadis 4 (Uddeholm Tooling, Švedska), brušeno na R<sub>a</sub> ≈ 0,2 μm. Vse štiri prevleke, debeline 2 μm, so bile nanesene z uporabo komercialnih postopkov fizikalnega nanašanja iz parne faze (FNV). Parametri nanašanja in lastnosti uporabljenih prevlek so predstavljeni v preglednici 1. Prevleka DPP z večplastno strukturo volframovega karbida (WC) in amorfne ogljika (a-C:H) je bila nanesena pri temperaturi podlage

deposited with excellent adhesion, there is always the risk of depositing a coating with poor adhesion [4]. Although this is very undesirable for cutting tools, it is not a disaster. However, if a coating fails on a forming tool, coating fragments can become a source of abrasive particles within the system, which can lead to poor surface quality of the product and the destruction of a very expensive tool. There are other reasons why normal hard coatings are not used more widely in forming-tool applications. One is the relatively high coefficient of friction generated by most of the commercial ceramic coatings used in cutting-tool applications [1], which leads to a high tendency to galling when sliding against soft metals [5]. However, in the last couple of years tremendous progress has been seen in the field of coating deposition as well as in introducing new carbon-based coatings with excellent frictional properties ([6] to [9]).

The aim of this study was to investigate the possibilities of using hard PVD (physical vapour deposition) coatings on forming tools. A tribological evaluation of TiN, TiB<sub>2</sub>, TaC and DLC coatings deposited on cold-worked tool steel was carried out in a load-scanning test rig and compared to the behaviour of different uncoated forming-tool steels, using soft austenitic stainless steel as the counter material.

## 1 EXPERIMENTAL WORK

Four different PVD coatings – TiN, TiB<sub>2</sub>, TaC and DLC – with a thickness of about 2 μm were used in this investigation. The investigated coatings were deposited on a hardened and tempered powder-metallurgy cold-worked tool steel, vanadis 4 (Uddeholm Tooling AB, Sweden), using commercial PVD processes. The process parameters and the properties of the coatings are listed in Table 1. The DLC coatings, which were WC-doped hydrogenated diamond-like carbon coatings with a multilayer structure of WC and amorphous carbon (a-C:H), were deposited at a substrate temperature of ~230°C. For the refractory hard coatings of TiN, TiB<sub>2</sub> and TaC, the deposition temperature was in the range between 70 and

Preglednica 1. Parametri nanašanja in lastnosti raziskovanih prevlek

Table 1. Deposition parameters and resulting coating properties

prevleka coating	postopek nanašanja deposition process	temperatura temperature [°C]	trdota hardness [GPa]	modul elastičnosti Young's modulus [GPa]	zaostale napetosti residual stress [GPa]
TiN	elektronski snop reactive e-beam	320 - 420	30±2	500±50	-3,8±0,4
TiB <sub>2</sub>	naprševanje sputtering	300	54±9	600±85	-0,5±0,2
TaC	naprševanje sputtering	70	15±2	230±20	-1,1±0,2
DLC	reakcijsko naprševanje reactive sputtering	230	12±1	130±7	-0,3±0,1



Preglednica 2. Postopek izdelave in sestava uporabljenih orodnih jekel za delo v hladnem

Table 2. Production process and nominal chemical composition of the investigated forming tool steels

orodno jeklo steel	postopek izdelave* production process*	kemična sestava nominal chemical composition						
		%C	%Si	%Mn	%Cr	%Mo	%V	%W
VANADIS 4	MP	1,5	1,0	0,4	8,0	1,5	4,0	-
VANADIS 6	MP	2,1	1,0	0,4	6,8	1,5	5,4	-
VANADIS 23	MP	1,3	0,5	0,3	4,2	5,0	3,1	6,4
WEARTEC	TN	2,8	0,8	0,7	7,0	2,3	8,9	-

\*MP – metalurgija prahov / powder metallurgy, TN – tehnologija naprševanja / spray forming

Preglednica 3. Toplotna obdelava in trdota površine raziskovanih orodnih jekel za delo v hladnem

Table 3. Process, heat treatments and resulting hardness values of the investigated forming tool steels

orodno jeklo steel		toplotna obdelava heat treatment	parametri toplotne obdelave treatment parameters	trdota hardness
VANADIS 4	AH	kaljenje hardening	1050°C/30min/air + 525°C/2x2h	62 HRC
VANADIS 4	AN	nitiranje v plazmi plasma nitriding	500°C/9h/95%H <sub>2</sub> -5%N <sub>2</sub>	1200 HV <sub>0,1</sub>
VANADIS 6	B	kaljenje hardening	1050°C/30min/ air + 525°C/2x2h	62 HRC
VANADIS 23	C	kaljenje hardening	1050°C/30min/ air + 560°C/3x1h	62 HRC
WEARTEC	D	kaljenje hardening	1020°C/30min/ air + 525°C/2x2h	62 HRC

~230 °C, medtem ko so bile enoplastne prevleke TiN, TiB<sub>2</sub> in TaC nanese v temperaturnem območju med 70 °C in 420 °C (preglednica 1). Za doseganje ustrezne oprijemljivosti prevlek so bile le-te nanese na ~0,1 µm debelo vmesno plast titana (TiN, TiB<sub>2</sub> in TaC) ali kroma (DPP).

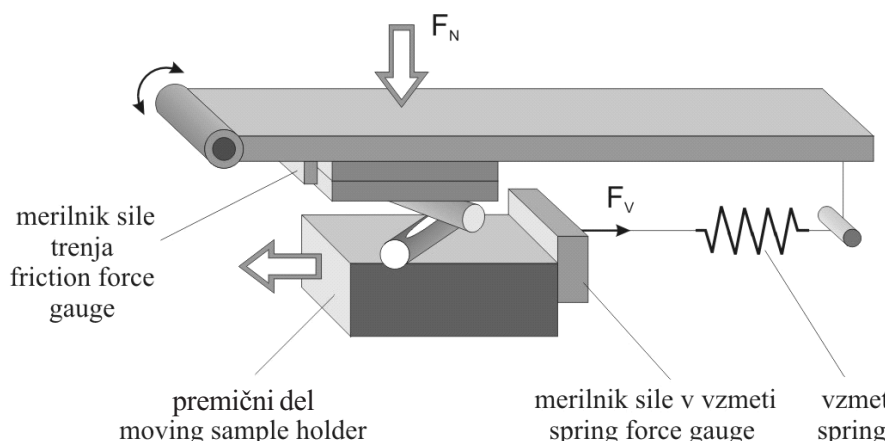
Tribološke lastnosti oplaščenega orodnega jekla vanadis 4 smo primerjali z lastnostmi neoplaščenega kaljenega ali nitiranega jekla vanadis 4 ter še s tremi orodnimi jekli za delo v hladnem jeklarne Uddeholm, predstavljenih v preglednicah 2 in 3. Kot protimaterial pa smo uporabili mehko žarjeno avstenitno jeklo AISI 304 (350 HV) ter kaljeno jeklo za kroglične ležaje AISI 52100 (850 HV).

Tribološki preizkusi so bili narejeni na napravi, katere izoblikovanje dveh cilindričnih preizkušancev s premerom 10 mm ( $R_a \approx 0,2 \mu\text{m}$ ) omogoča izmenično in zvezno povečevanje ter zmanjševanje obremenitve med samim drsenjem ([10] in [11]), (sl. 1). Pri tem je vsaka točka vzdolž drsne poti pri obeh preizkušancih izpostavljena točno določeni obremenitvi. V predstavljeni raziskavi je bila obremenitev v območju med 100 in 1300 N, kar ustreza Hertzovemu stičnemu tlaku med 1 GPa in 5 GPa. Določitev tornih lastnosti in sposobnosti raziskovanih materialov preprečiti prenos ter lepljenje protimateriala (avstenitno jeklo) na površino

420°C. To improve the adhesion of the coatings, a thin (~0,1 µm) Ti intermediate layer was deposited for the TiN, TiB<sub>2</sub> and TaC coatings, and a Cr layer for the DLC coating, prior to the coating deposition.

The tribological properties of the coated vanadis 4 steel were investigated in the load-scanning test rig and compared to uncoated hardened or plasma nitrided vanadis 4 steel, as well as to three different forming-tool steels, produced at Uddeholm Tooling AB, see Table 2. The heat treatments and the hardness values of the forming-tool steels included in this investigation are given in Table 3. As a counter material in the load-scanning tests, a soft (350 HV) austenitic stainless steel (AISI 304) was used for the friction tests and a hardened and tempered (850 HV) ball-bearing steel (AISI 52100) for the wear-resistance assessment.

In the load-scanning test rig, which involves two crossed, elongated cylindrical test specimens of diameter 10 mm ( $R_a \approx 0,2 \mu\text{m}$ ) that are forced to slide against each other under a constant speed, the normal load is allowed to gradually increase during the forward stroke and to correspondingly decrease during the reverse stroke ([10] and [11]), Figure 1. Thus, each point along the contact path of both specimens will experience a unique load and display a unique tribological history after the completion of the test. For the purpose of this investigation the range of the normal load was of the order of 100 to 1300 N. However, depending on the tribological property investigated, a different mode of testing was used. For the purpose of anti-sticking tests, where the ability of the investigated materials and coatings



Sl. 1. Shematični prikaz naprave za tribološko preizkušanje  
Fig. 1. Load-scanning test rig

orodja je potekalo v razmerah suhega drsenja, pri drsni hitrosti 0,01 m/s. Preizkus je bil končan, ko je obremenitev dosegla največjo vrednost 1300 N.

Za določitev tornih lastnosti raziskovanih prevlek in orodnih jekel za delo v hladnem proti mehko žarjenemu avstenitnemu jeklu smo uporabili ponavljajoče preizkušanje pri drsni hitrosti 0,1 m/s. Pred preizkusom je bila na površino preizkušancev nanescena tanka plast neaditiviranega poli-alfa-olefinskega olja (PAO;  $v_{40} = 46,6 \text{ mm}^2/\text{s}$ ) debeline  $\sim 10 \text{ }\mu\text{m}$ .

Tudi obrabna obstojnost raziskovanih materialov je bila določena pri drsni hitrosti 0,1 m/s, pri čemer je bil protipreizkušanec, izdelan iz kaljenega jekla 100Cr6, potopljen v neaditivirano olje PAO. Obraba raziskovanih materialov v razmerah mejnega mazanja je bila določena z uporabo optične mikroskopije in profilometrije, in to po 200 ciklih izmeničnega drsenja, na točki izpostavljeni obremenitvi 700 N.

## 2 REZULTATI

Slika 2 prikazuje torne lastnosti raziskovanih materialov v obliki koeficienta trenja kot funkcijo obremenitve. V primeru kaljenega jekla vanadis 4 se začetni koeficient trenja giblje v območju med 0,3 in 0,35. Prvi znaki adhezije avstenitnega jekla na dotikalno površino orodnega jekla se, v obliki nenadnega povečanja koeficienta trenja, kažejo pri obremenitvi  $\sim 200 \text{ N}$ , kar je mikroskopija dotikalne površine tudi potrdila. Podobno obnašanje je moč zaslediti pri vseh orodnih jeklih, vključenih v raziskavo, kar prikazuje slika 2a. V odvisnosti od obremenitve, pri kateri se prične na dotikalni površini orodnega jekla ustvarjati plast prenesenega avstenitnega jekla, pa je moč raziskovana orodna jekla razdeliti v dve skupini (sl. 3a). Pri prvi skupini, ki

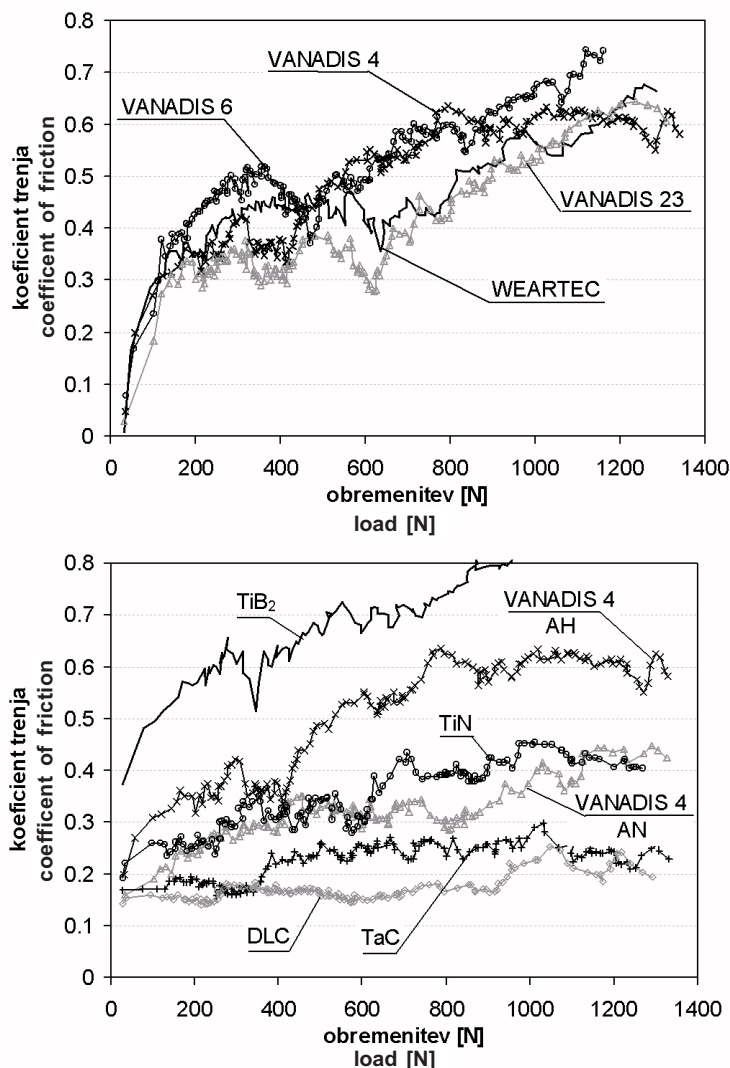
to prevent the transfer of a soft austenitic stainless steel to the tool surface was evaluated, the test equipment was set to a single, forward stroke mode. Dry sliding conditions with a sliding speed fixed to 0,01 m/s were used.

To determine the frictional behaviour of the investigated materials against austenitic stainless steel under starved lubricated conditions, the load-scanning test rig was set to multicycle mode. An approximately 10- $\mu\text{m}$ -thick film of pure poly-alpha-olefin oil (PAO,  $v_{40} = 46,6 \text{ mm}^2/\text{s}$ ) was applied to the austenitic stainless steel sample before each test.

The same test procedure, with the sliding speed of 0.1 m/s, the multicycle mode and the use of lubricant was used to determine the wear resistance of different materials and coatings under boundary lubrication. However, a hardened ball-bearing steel had to be used as the counter material to induce wear of the investigated materials and coatings. The maximum number of test cycles was 200. During testing the coefficient of friction was monitored as a function of load and time, and after the completion of the test a critical load corresponding to the appearance of material transfer and wear of the investigated materials were determined by post-test optical microscopy (OM) and optical surface profilometry, respectively.

## 2 RESULTS AND DISCUSSION

Figures 2a and b reveal the anti-sticking properties as the monitored friction coefficient versus load in the dry sliding test. In the case of hardened vanadis 4 steel against austenitic stainless steel the initial friction coefficient varied between 0.30 and 0.35. The first sign of adhesion of work material to the tool-steel surface, as indicated by a sudden increase in friction and confirmed by post-test microscopic observation, was detected at a load of about 200 N. Similar results with only marginal differences in frictional behaviour were observed for all the forming-tool steels investigated, as shown in Fig. 2a. However, depending on the load at which a layer of stainless steel starts to build-up on the tool surface, the investigated forming-tool steels can be classified into



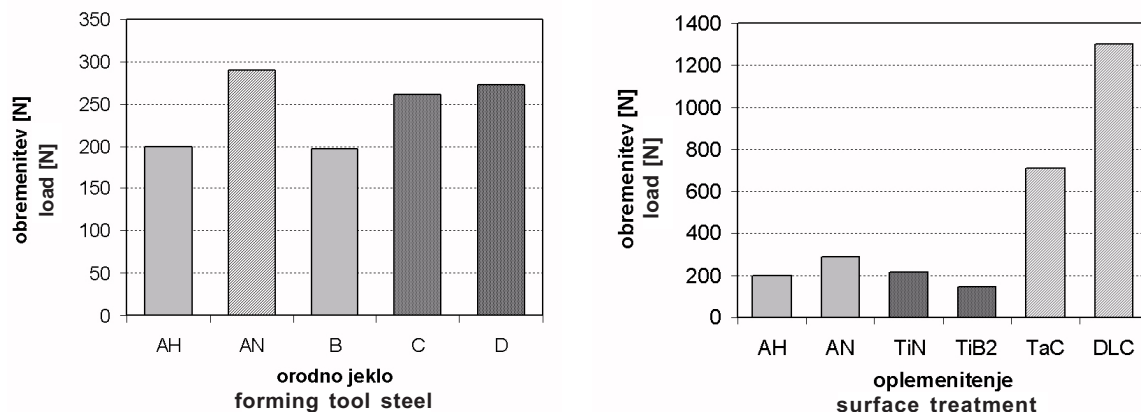
Sl. 2. Koeficient trenja v odvisnosti od obremenitve; (a) orodna jekla za hladno preoblikovanje in (b) oplemeniteno orodno jeklo za hladno preoblikovanje vanadis 4  
 Fig. 2. Friction coefficient vs. normal load for (a) forming-tool steels and (b) surface-engineered vanadis 4 steel, recorded during sliding against stainless steel

vključuje kaljeni jekli vanadis 4 in vanadis 6, se adhezija ter prenos avstenitnega jekla na dotikalno površino orodja prične pri obremenitvi, nižji od 200 N. Pri jeklih vanadis 23 in weartec, ki spadata v drugo skupino, pa v območju med 250 in 300 N (sl. 3a).

Sliki 2b in 3b prikazujeta krivulje koeficienta trenja ter kritično obremenitev adhezije in prenosa avstenitnega jekla na dotikalno površino za primer oplemenitenega orodnega jekla vanadis 4. Tudi v primeru oplemenitenega orodnega jekla vanadis 4 nenadno povečanje koeficienta trenja sovpada s pričetkom adhezije oziroma lepljenjem avstenitnega jekla na dotikalno površino orodnega jekla. V primerjavi s kaljenim orodnim jeklom, nitriranje v plazmi, zniža koeficient trenja ter daje boljše adhezijsko odpornost površine ( $L_c \approx 300$  N). Kljub vsemu pa z nitriranjem v plazmi ne moremo doseči izrednih tornih lastnosti, ki jih ponujata prevleki TaC in DPP, kar prikazujeta sliki 2b in 3b.

two groups, see Fig. 3a. For the first group with hardened vanadis 4 and vanadis 6 steel, the transfer of work material started at a load of approximately 200 N, whereas vanadis 23 and weartec steels displayed adhesion of the austenitic stainless steel in the load range 250 to 300 N, see Fig. 3a.

Figures 2b and 3b show coefficient-of-friction curves and critical loads of material transfer, respectively, for surface-engineered vanadis 4 steel. A sudden increase in the friction was found to correspond to the beginning of material transfer for the nitrated vanadis 4, and the vanadis 4 with TiN, TiB<sub>2</sub> and TaC coatings. Plasma nitriding improved the anti-sticking properties of vanadis 4 ( $L_c \approx 300$  N), which then outperformed all the other forming-tool steels investigated. However, the plasma-nitrated surfaces were unable to match the very good behaviour obtained with the TaC and DLC coatings, as shown in Figs. 2b and 3b.



Sl. 3. Kritična obremenitev pričetka prenosa in tvorjenja plasti avstenitnega jekla na dotikalni površini raziskovanih materialov, določena z optično mikroskopijo; (a) orodna jekla za hladno preoblikovanje (preglednica 3) in (b) oplemeniteno orodno jeklo za hladno preoblikovanje vanadis 4

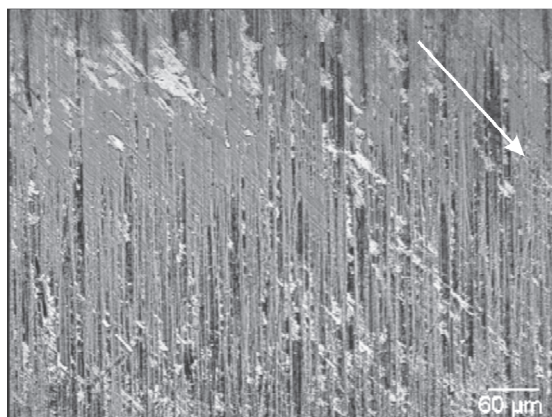
Fig. 3. Beginning of the transfer of stainless steel to (a) forming-tool steels and (b) surface-engineered vanadis 4 steel

Prevlaki TaC in DPP znižata začetni koeficient trenja ( $\mu \approx 0,15$ , sl. 2b) ter dajeta najmanjšo verjetnost prenosa obdelovanega materiala. Pri prevleki TaC se je adhezija in prenos avstenitnega jekla pričela pri obremenitvi  $\sim 700$  N, medtem ko pri prevleki DPP tudi pri največji obremenitvi 1300 N ni prišlo do nastajanja povezane plasti prenesenega avstenitnega jekla na dotikalni površini, kakor prikazuje slika 4a. Na drugi strani pa prevleka TiB<sub>2</sub> kaže najvišji koeficient trenja proti avstenitnemu jeklu ( $\mu = 0,5 - 0,8$ ) in takojšen prenos obdelovanega materiala na dotikalno površino orodja (slika 4b). Kljub temu, da je uporaba prevleke TiN znižala začetni koeficient trenja na  $\sim 0,25$  pa, v primerjavi s kaljenim orodnim jeklom, to ni imelo nikakršnega vpliva na postopek prenosa obdelovanega materiala, kakor prikazuje slika 3b.

Spremljanje koeficienta trenja v odvisnosti od obremenitve in števila ponovitev omogoča izdelavo tornih kart, ki prikazujejo spremembe v

The TaC and DLC coatings considerably reduced the initial friction coefficient against austenitic stainless steel ( $\mu \approx 0.15$ , see Fig. 2b) and gave the lowest sensitivity to material transfer. For the TaC coating, the transfer of stainless steel started at a load of around 700 N, whereas virtually no transfer of work material could be detected for DLC-coated vanadis 4 steel up to a maximum load of 1300 N, as shown in Fig. 4a. On the other hand, the TiB<sub>2</sub> coated steel showed by far the highest friction coefficient (0.5–0.8), and an almost instantaneous transfer of stainless steel to the coated surface (Fig. 4b). The application of a TiN coating reduced the initial friction coefficient to about 0.25, but this did not have any influence on the process of material transfer in comparison to uncoated vanadis 4 steel, see Figs. 3a and b.

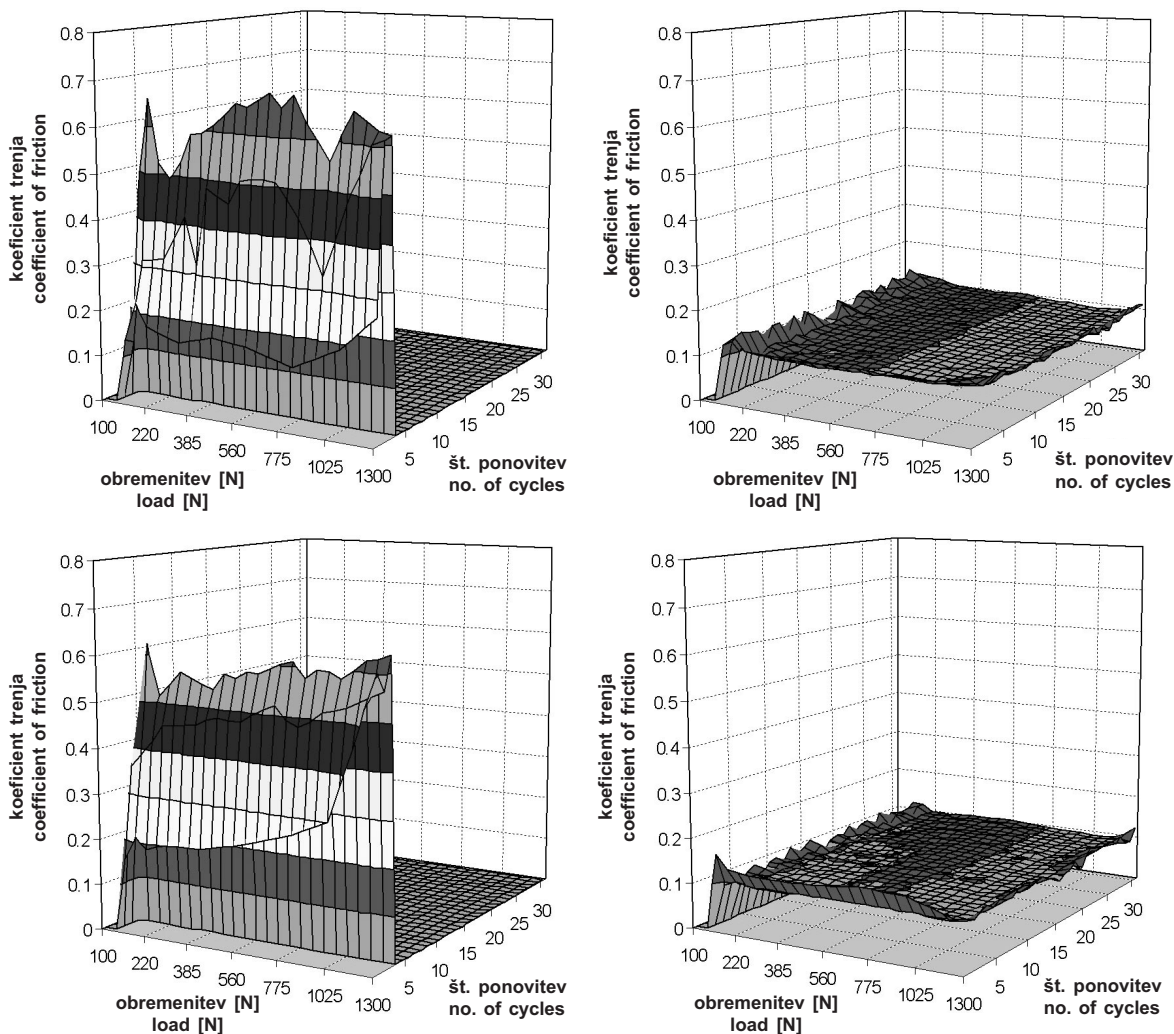
Monitoring the friction coefficient as a function of load and time makes it possible to prepare friction maps, which show the transition points in the



Sl. 4. Izgled dotikalne površine pri pričetku prenosa avstenitnega jekla; (a) DPP prevleka pri obremenitvi 1300 N in (b) TiB<sub>2</sub> prevleka pri obremenitvi 150 N

Fig. 4. Typical appearance of the contact surfaces of sliding-test specimens at the beginning of stainless-steel transfer (light contrast). a) DLC coating at 1300 N load, and (b) TiB<sub>2</sub> coating at 150 N load. The arrows indicate the direction of sliding





Sl. 5. Torne slike za oplemeniteno orodno jeklo vanadis 4: (a) nitrirano v plazmi + PAO, (b) nitrirano v plazmi + izbrano olje za hladno preoblikovanje, (c) prevlečeno s prevleko TiN + PAO in (d) prevlečeno s DPP prevleko + PAO

Fig. 5. Friction maps for surface-engineered vanadis 4 steel, sliding against soft austenitic stainless steel. (a) plasma-nitrided steel + PAO, (b) plasma-nitrided steel + fully formulated forming oil – Castrol Ilform, (c) TiN coated steel + PAO, (d) DLC coated steel + PAO

torjem obnašanju oplemenitenega orodnega jekla vanadis 4 (sl. 5). V primeru kaljenega ali nitriranega orodnega jekla za delo v hladnem je prišlo do prehoda iz začetnega mejnega mazanja v področje suhega trenja med drugo ponovitvijo, in to pri obremenitvi  $\sim 400$  N, po vsega treh ponovitvah pa je bilo treba preizkus zaradi čezmernega prenosa obdelovanega materiala ustaviti (sl. 5a). Podobno torno obnašanje z začetnim koeficientom trenja v območju med 0,15 in 0,2 ter prehod v področje suhega trenja že med drugo ponovitvijo, smo opazili pri vseh raziskovanih orodnih jeklih za delo v hladnem. Z uporabo izbranega olja za hladno preoblikovanje (Castrol Ilform TDN 81,  $v_{40} = 120 \text{ mm}^2/\text{s}$ ) smo že z nanosom  $\sim 10 \mu\text{m}$  mazalne plasti na dotikalno površino zagotovili enakomeren potek koeficienta trenja v celotnem obremenilnem območju in popolnoma

tribological behavior of the investigated materials. Friction maps for plasma-surface-treated vanadis 4 steel loaded against austenitic stainless steel under starved lubrication conditions are shown in Fig. 5. An increase in the friction was detected as early as the second stroke, at  $\approx 400$  N load, for the hardened or plasma-nitrided steel, and the test had to be stopped due to the extensive transfer of stainless steel to the tool-steel surface after the third stroke, as indicated in Fig. 5a. These results indicate that as the reciprocal sliding proceeds, the initial regime of boundary lubrication moves towards a mixture of boundary lubrication and dry sliding. Similar results, with the initial friction in the range 0.15 to 0.20, and the transfer of work material starting during the second stroke, were observed for all forming-tool steels investigated. However, the use of a fully formulated forming oil gave a very smooth sliding of the nitrided

preprečili prenos obdelovanega materiala, kar prikazuje slika 5b.

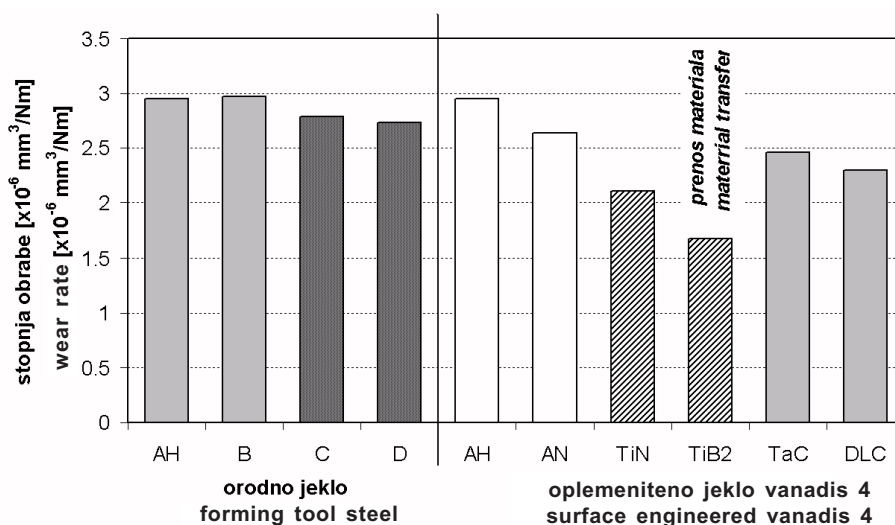
Pri uporabi trdih keramičnih prevlek TiN in TiB<sub>2</sub> je prišlo do preboja mazalne plasti in prehoda v področje suhega trenja s prenosom obdelovanega materiala že med prvo ponovitvijo, zaradi česar je bilo treba preizkus ustaviti že po dveh ponovitvah (sl. 5c). Na drugi strani pa prevleki na podlagi trdega ogljika (TaC in DPP) zagotavljata precej boljše torne lastnosti dotikalne površine. Kljub temu, da je tudi v primeru prevleke TaC prišlo do preboja mazalne plasti in prenosa obdelovanega materiala, je bilo to omejeno le na največje obremenitve ( $F_N \geq 1000$  N). Ti rezultati kažejo na slabo nosilnost same prevleke oziroma pomanjkljivo oprijemljivost prevleke na podlago. Najboljše rezultate, primerljive z uporabo izbranega olja za hladno preoblikovanje in neoplaščenega jekla vanadis 4, pa smo dosegli z uporabo prevleke DPP, ki daje že ob najmanjši količini neaditiviranega PAO olja enakomeren koeficient trenja ( $\mu \sim 0,1$ ) in popolno zaščito pred prenosom obdelovanega materiala v celotnem obremenitvenem območju (sl. 5d).

Razlika v obrabni obstojnosti raziskovanih materialov, določeni v pogojih mejnega mazanja, je bila precej manjša kakor v primeru tornih lastnosti. Slika 6 prikazuje stopnjo obrabe raziskovanih materialov v točki vzdolž dotikalne poti, ki ustraja obremenitvi 700 N oziroma dotikalnemu tlaku  $\approx 4,2$  GPa. Na splošno je moč reči, da nitriranje v plazmi ter nanos trde prevleke izboljšata obrabno obstojnost orodnega jekla, kar velja za celotno obremenitveno območje (sl. 6). Kljub vsemu pa razlaga rezultatov obrabnih preizkusov ni preprosta, saj hkrati deluje več obrabnih mehanizmov.

steel ( $\mu \approx 0.1$ ) and complete protection against material transfer, see Fig. 5b.

Figures 5c and d show friction maps for the coated forming-tool steel loaded against austenitic stainless steel. In the case of TiN-coated steel, a rapid increase in friction corresponding to a rapid transfer from boundary lubricated to dry sliding started as early as the first stroke, at a load of approximately 1100 N (Fig. 5c). The TiB<sub>2</sub> coating showed similar results with an even higher increase rate in friction under starved lubricated conditions (0.4–0.6), and an immediate transfer of stainless steel. On the other hand, TaC- and DLC-coated samples showed improved frictional properties under starved lubrication conditions, in comparison with uncoated steel. For the TaC coating, an increase in friction was also detected during the second stroke; however, it was more load dependent with the adhesion of the work material limited to the highest loads ( $F_N \geq 1000$  N). Due to insufficient adhesion, the TaC coating may fail under high loads, leading to exposure of the substrate material, and accelerated material transfer. By far the best results were obtained for the DLC-coated steel, which during the entire 50-cycle test displayed a uniform frictional behavior with a friction coefficient of  $\sim 0.1$ , see Fig. 5d.

The differences in wear resistance among the test materials were not as dramatic in terms of sliding wear under boundary lubrication as they were in terms of friction, see Fig. 6. It shows the wear rate of the investigated materials measured using a profilometric technique at a position corresponding to a load of 700 N ( $\approx 4.2$  GPa maximum Hertzian contact pressure). Similar results were observed for the whole load range. The general observations are that plasma nitriding or coating improve the wear resistance of the surfaces. However, it is not at all straightforward to interpret the sliding-wear test results, since several mechanisms are operating simultaneously.



Sl. 6. Stopnja obrabe raziskovanih materialov (mejno mazanje, PAO,  $F_N = 700$  N, 200 ponovitev)  
Fig. 6. Wear rate of investigated materials loaded against ball-bearing steel under starved lubrication conditions (POA,  $F_N = 700$  N, 200 cycles)

Na splošno bi morala dati kombinacija velike trdote prevleke in nizkega koeficienta trenja tudi majhno stopnjo obrabe. V našem primeru protimaterial (jeklo za kroglične ležaje, 100Cr6) vsebuje majhen delež trdih delcev (Cr in Fe karbidi), ki lahko povzročijo abrazijsko obrabo raziskovanih materialov. S tega vidika naj bi dala uporaba trdih prevlek precejšnje izboljšanje obrabne obstojnosti dotikalne površine. Po drugi strani pa se lahko delci prevleke vtisnejo v »mehak« protimaterial in povzročijo razenje same prevleke. Kar se tiče trenja pa visok koeficient trenja pospešuje adhezijo in prenos protimateriala na oplaščeno površino, ki nato preprečuje nadaljnjo obrabo osnovne površine.

Kakor v primeru tornih lastnosti (sl. 2a) je tudi razlika v obrabni obstojnosti raziskovanih orodnih jekel za hladno preoblikovanje najmanjša. Ponovno pa jekli vanadis 23 in weartec kažeta nekoliko boljše obrabno obstojnost, kar prikazuje slika 6. Na drugi strani daje uporaba postopka nitriranja v plazmi tudi do 20% boljše obrabno obstojnost orodnega jekla vanadis 4. V primeru oplaščenega orodnega jekla sta prevleki TiN in TiB<sub>2</sub> precej presegle obrabno obstojnost prevlek z izjemnimi tornimi lastnostmi, prevlek TaC in DPP (sl. 2b). Dobljene rezultate je moč razložiti s tvorjenjem plasti prenesenega protimateriala na površini keramične prevleke, ki nato ščiti prevleko pred obrabo. V primeru prevleke TiB<sub>2</sub> je bilo treba obrabni preizkus zaradi čezmernega prenosa materiala celo ustaviti, in to že po vsega 15 ponovitvah.

V primeru orodij za hladno preoblikovanje je možnost površine preprečevati adhezijo in prenos obdelovanega materiala pogosto precej bolj pomembna kakor njena obrabna obstojnost. Tako obrabno obstojni prevleki TiN in TiB<sub>2</sub>, z visokim koeficientom trenja in veliko verjetnostjo adhezije ter prenosa obdelovanega materiala na dotikalno površino orodja, ne pomenita najboljše rešitve za izboljšanje lastnosti orodij za hladno preoblikovanje. Poleg tega lahko slaba kakovost prevleke privede do njenega luščenja in posledično do poškodbe izredno dragega preoblikovalnega orodja. Ker daje sprememba v sestavi in/ali mikrostrukturi jekla za hladno preoblikovanje omejene možnosti izboljšanja tornih in obrabnih lastnosti površine, je nitriranje v plazmi trenutno najprimernejši način izboljšanja triboloških lastnosti in obstojnosti preoblikovalnih orodij. Na drugi strani prevleka DPP, z dobro obrabno obstojnostjo in izjemnimi tornimi lastnostmi ter možnostjo preprečevati adhezijo obdelovanega materiala na dotikalno površino orodja, kaže izjemen potencial v preoblikovalni industriji.

### 3 SKLEPI

- Vsa orodna jekla za delo v hladnem, vključena v raziskavo, imajo podobne torne in protiobrabne lastnosti, pri čemer jekli vanadis 23 in weartec rahlo izstopata.
- V primerjavi s kaljenjem daje nitriranje v plazmi tudi

Generally, high hardness in combination with low friction should give a low wear rate. The counter material (ball-bearing steel) contains a small volume content of hard particles in the form of  $\mu\text{m}$ -sized Cr and Fe carbides (about 1200–1500 HV), which could wear some of the tested surfaces abrasively. Thus, a hard coating would act beneficially. On the other hand, wear fragments from the coatings and treated tool-steel surfaces could possibly be embedded in the counter material and act as abrasives against the test materials. As to the friction, a high friction promotes adhesion of the counter material to the wearing surface, which may prevent further wear.

As in the case of the friction against stainless steel (Fig 2a), all forming-tool steels were rather difficult to separate when comparing wear in the sliding test against ball-bearing steel, see Fig. 6. Vanadis 23 and weartec did display a slightly better wear resistance than the other samples. On the other hand, plasma nitriding gave up to 20% higher wear resistance of vanadis 4 steel. In the case of coated tool steel, the TaC and DLC coatings, giving the lowest friction (Fig. 2b) were outperformed by the TiN and TiB<sub>2</sub> coatings. This is likely to be explained by the protective action of the adhered work material, which appeared most frequently on the latter coatings. With the TiB<sub>2</sub> coating, the wear tests had to be stopped after approximately 15 cycles due to extensive material transfer and building up of a thick layer of counter material on the coated surface.

In the case of forming tools, the ability of the surface to prevent the adhesion of work material is often more important than its wear resistance. Therefore, hard wear-resistant ceramic coatings of TiN and TiB<sub>2</sub> with a high tendency for material transfer do not represent the best solution. In addition, poor adhesion of the coating may lead to coating spallation, causing a deterioration in the forming tool's performance instead of the expected improvement. Since changes in forming-tool steel's composition and/or structure gives limited improvement in tool performance, plasma nitriding represents the most reliable way of improving the tribological properties of forming tools. On the other hand, the DLC coating was found to prevent any transfer of work material to the coated surface even under starved lubrication by non-additivated PAO, Fig. 6. Assuming that adequate coating-to-substrate adhesion is obtained, DLC coatings seem to be the best solution for improving the tribological properties of forming tools.

### 3 CONCLUSIONS

- All the forming-tool steels investigated give comparable friction and wear results when tested in a load-scanning test rig against soft austenitic stainless steel and ball-bearing steel, respectively. However, vanadis 23 and weartec show a slight

do 50% boljšo adhezijsko odpornost proti avstenitnemu jeklu ter do 20% boljšo obrabno obstojnost orodnega jekla za hladno preoblikovanje.

- Kljub temu, da dajeta prevleki TiN in TiB<sub>2</sub> najboljše obrabno obstojnost, pa velika verjetnost prenosa obdelovanega materiala na dotikalno površino orodja omejuje njuno praktično uporabo. Izjemen potencial pri preoblikovanju avstenitnega jekla pomeni mehkejša prevleka na podlagi trdega ogljika (DPP) z dobro obrabno obstojnostjo ter odličnimi tornimi lastnostmi.
- Ob doseganju ustrezne oprijemljivosti prevleke na podlago bi lahko uporaba prevlek na podlagi trdega ogljika omejila ali celo izločila uporabo maziv v postopku hladnega preoblikovanja.

#### Zahvala

Delo je nastalo s finančno pomočjo Uddeholm Toolong AB, Švedskega raziskovalnega sveta in Carl Trygger ustanove. Zahvala gre tudi Uddeholm Tooling in Balzers Sandvik Coating AB za pripravo preizkušancev in nanos DPP prevlek, Urbanu Wiklundu in Danielu Nilssonu z Univerze v Uppsali za pripravo prevlek TiN, TaC in TiB<sub>2</sub>, ter Vojtehu Leskovšku z Inštituta za kovinske materiale in tehnologije v Ljubljani za izvedbo nitriranja v plazmi.

advantage over the rest.

- After plasma nitriding, the vanadis 4 steel outperformed all the other forming-tool steels investigated in terms of anti-sticking properties as well as wear resistance. Therefore, plasma nitriding represents a reliable way of improving the tribological performance of forming-tool materials.
- Although the hard TiN and TiB<sub>2</sub> coatings showed the best wear resistance, they possess a high tendency to pick up work material. On the other hand, the softer DLC coating with its excellent anti-sticking properties and sufficiently good wear resistance shows a high potential for use in forming-tool applications.
- On the condition that adequate coating-to-substrate adhesion is obtained, the use of DLC-coated forming tools could limit or even eliminate the use of lubricants in cold-forming applications.

#### Acknowledgements

Uddeholm Toolong AB, The Swedish Research Council and Carl Trygger Foundation are greatly acknowledged for their financial support. The supply of test materials and DLC coatings from Uddeholm Tooling and Balzers Sandvik Coating AB, respectively, is much appreciated. Many thanks go also to Urban Wiklund and Daniel Nilsson for preparation of the TiN, TaC and TiB<sub>2</sub> coatings and to Vojteh Leskovšek for preparation of the plasma-nitrided samples.

#### 4 LITERATURA

#### 4 REFERENCES

- [1] Bhushan, B. (2000) Modern tribology handbook. CRC Press, NY.
- [2] Imbeni, V., C. Martini, E. Lanzoni, G. Poli, I.M. Hutchings (2001) Tribological behaviour of multi-layered PVD nitride coatings. *Wear* 251, 997–1002.
- [3] Hogmark, S., S. Jacobson, M. Larsson, U. Wiklund (2000) Mechanical and tribological requirements and evaluation of coating composites, in modern tribology handbook. ed. B. Bhushan. *CRC Press*, NY.
- [4] Renevier, N.M., J. Hampshire, V.C. Fox, J. Witts, T. Allen, D.G. Teer (2001) Advantages of using self-lubricating, hard, wear-resistant MoS<sub>2</sub>-based coatings. *Surface and Coatings Technology* 142-144, 67-77.
- [5] Holmberg, K., A. Matthews. (1994) Coatings tribology. *Elsevier Tribology Series 28*. Elsevier, Amsterdam.
- [6] Erdemir, A., F.A. Nichols, X.Z. Pan, R. Wei, P. Wilbur (1993) Friction and wear performance of ion-beam-deposited diamond-like carbon films on steel substrates. *Diamond and Related Materials* 3, 119-125.
- [7] Kodali, P., K.C. Walter, M. (1997) Nastasi, Investigation of mechanical and tribological properties of amorphous diamond-like carbon coatings. *Tribology International* 30, 591-598.
- [8] Wanstrand, O., N. Axen, R. Fella (1997) A tribological study of PVD coatings with carbon-rich outer layers. *Surface and Coatings Technology* 94-95, 469-475.
- [9] Rincon, C., G. Zambrano, A. Carvajal, P. Prieto, H. Galindo, E. Martinez, A. Lousa, J. Esteve (2001) Tungsten carbide/diamond-like carbon multilayer coatings on steel for tribological applications. *Surface and Coatings Technology* 148, 277-283.
- [10] Hogmark, S., S. Jacobson, O. Wanstrand (1999) A new universal test for tribological evaluation. *Proceedings of the 21<sup>st</sup> IRG-OECD Meeting*, Amsterdam.
- [11] Hogmark, S., S. Jacobson, O. Wanstrand (2000) The Uppsala loadscanner – an Update. *Proceedings of the 22<sup>nd</sup> IRG-OECD Meeting*, Cambridge.



Naslovi avtorjev: doc.dr. Bojan Podgornik  
Univerza v Ljubljani  
Fakulteta za strojništvo  
Center za tribologijo in tehnično  
diagnostiko  
Bogišičeva 8  
1000 Ljubljana  
bojan.podgornik@ctd.uni-lj.si

prof. Sture Hogmark  
The tribomaterials group  
Ångström Laboratory  
Univerza v Uppsali  
Box 534  
SE- 751 21 Uppsala

dr. Odd Sandberg  
Uddeholm Tooling AB  
SE-683 85 Hagfors

Authors' Addresses: Doc.Dr. Bojan Podgornik  
University of Ljubljana  
Faculty of Mechanical Eng.  
Centre for Tribology and  
Technical Diagnostics  
Bogišičeva 8  
SI- 1000 Ljubljana  
bojan.podgornik@ctd.uni-lj.si

Prof. Sture Hogmark  
The tribomaterials group  
Ångström Laboratory  
Uppsala University  
Box 534  
SE- 751 21 Uppsala

Dr. Odd Sandberg  
Uddeholm Tooling AB  
SE-683 85 Hagfors

Prejeto: 17.12.2002  
Received:

Sprejeto: 8.4.2004  
Accepted:

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

## «Šest sigm» v razvoju postopka izdelave Six Sigma in Process Design

Duško Pavletić - Sandro Fakin - Mirko Soković

*Prispevek se ukvarja z uporabo metodologije »šest sigm« v razvoju postopka izdelave. Na primeru obdelave okrova kompresorja je razložen razvoj postopka v Cimosovi tovarni v Buzetu in možnosti uporabe nekaterih orodij »šest sigm«, predvsem mape postopka in vzročno-posledične matrice. Prikazan je prilagojen razvoj poteka postopka z vgrajeno uporabo omenjenih orodij, narejena je primerjava sedanjega in novega načina poteka postopka in pojasnjeni so doseženi rezultati.*

© 2004 Strojniški vestnik. Vse pravice pridržane.

**(Ključne besede: metodologija šest sigma, razvoj postopkov, mape postopkov, matrice vzročno-posledične)**

*This paper deals with the application of Six Sigma methodology in process design. Using an example of compressor-housing machining the process design and development at the Cimos facility in Buzet and the possibilities for some Six Sigma tools' applications are explained. The primary tools are the process map and the cause-and-effect matrix. A modified process design flow with incorporated applications of the mentioned tools are shown, a comparison of the old and the modified process-design flow is made and the obtained results are discussed.*

© 2004 Journal of Mechanical Engineering. All rights reserved.

**(Keywords: Six Sigma methodology, process design, process maps, cause-and-effect matrix)**

### 0 UVOD

»Šest sigm« je program izboljšanja kakovosti z namenom zmanjšati število napak pod 3,4 kose na milijon izdelanih. Pri tem se uporablja običajna porazdelitev in močna povezava med neustreznostmi izdelka oziroma napakami in številom izdelanih kosov, zanesljivostjo, časom izdelave, opremo, načrti itn. [1].

»Šest sigm« poudarja inteligentno mešanico modrosti organiziranja s preizkušenimi statističnimi orodji za izboljšanje tako učinkovitosti kakor zmožnosti organizacije pri upoštevanju potreb odjemalcev. Končni cilj ni izboljšanje zaradi izboljšanja, ampak bolj ustvarjanje ekonomske blaginje za odjemalca in prav tako dobavitelja [2] in [3]. To nakazuje, da »šest sigm« ne nadomešča znane in trajajoče pobude za kakovost v organizaciji, ampak da se najvišje vodstvo osredotoča na tiste postopke, ki so prepoznani kot ključni za kakovost v očeh odjemalcev. Ti kritični sistemi so nato predmet natančnih pregledov in močnih naporov za izboljšanja; uporaba najmočnejših »mehkih« in »trdih« veščin organizacije lahko pripelje do napredka [4].

»Šest sigm« projekti neprekinjenega postopka izboljšav so vodeni od zasnove do izvršitve,

### 0 INTRODUCTION

Six Sigma is a quality-improvement program that aims to reduce the number of defects to as low as 3.4 parts per million. It uses the normal distribution and the strong relationship between product nonconformities, or defects, and product yield, reliability, cycle time, inventory, schedule, etc. [1].

Six Sigma emphasizes an intelligent blending of the wisdom of an organization with proven statistical tools to improve both the efficiency and the effectiveness of the organization when it comes to meeting customer needs. The ultimate goal is not simply improvement for improvement's sake, but rather the creation of economic wealth for the customer and the provider alike. This does, not imply that Six Sigma replaces existing and ongoing quality initiatives in an organization, rather that senior management focuses on those processes identified as critical-to-quality in the eyes of customers. Those critical systems are then the subject of intense scrutiny and improvement efforts, using the most powerful soft and hard skills that the organization can bring to bear [2].

Six Sigma projects of continuous process improvement are led, from concept to completion,

skozi pet projektno usmerjenih korakov ali faz, imenovanih DIAIK (definiraj, izmeri, analiziraj, izboljšaj in krmili) [5].

## 1 RAZVOJ IN PRIPRAVA POSTOPKA

Postopek razvoja in priprave postopka izdelave bodo razloženi na primeru obdelave okrova kompresorja, prikazanega na sliki 1. Ulitke naredijo v Cimosovi livarni v Roču iz aluminijeve zlitine. Celotna mehanska obdelava pa je opravljena v Cimosovi tovarni v Buzetu na Hrvaškem.

Običajno je razvoj postopka izdelave v Cimosovi tovarni v Buzetu razdeljen na pet korakov [6]:

- študij izvedljivosti postopka,
- načrtovanje postopka,
- priprava postopka,
- preizkusna proizvodnja in
- kvalifikacija postopka.

Postopki, ki imajo neposredni vpliv na kakovost izdelka, morajo biti natančno določeni. Zato je pri načrtovanju postopka izdelave treba prepoznati in utemeljiti ustrezne zahteve kakovosti. Za doseg teh pogojev je med drugim treba določiti:

- načrt razvoja postopka za nove ali spremenjene izdelke, skupaj z jasno dokumentiranimi proizvodnimi koraki in tokom materiala;
- ustrezno proizvodno opremo in delovno okolje;
- vzdrževanje in preventivno vzdrževanje opreme in delovnega okolja za zagotavljanje stalne razpoložljivosti proizvodnega sistema;
- postopke in metode za zagotavljanje kakovosti postopka izdelave;
- skladnost opravil s predpisi in standardi, zakoni, definiranimi odgovornostmi, načrtom menedžment kakovosti (MK) kakor tudi z zahtevami odjemalcev glede kakovosti;

through five project-management steps or phases named DMAIC (Define, Measure, Analyze, Improve, Control) [5].

## 1 PROCESS DESIGN AND DEVELOPMENT

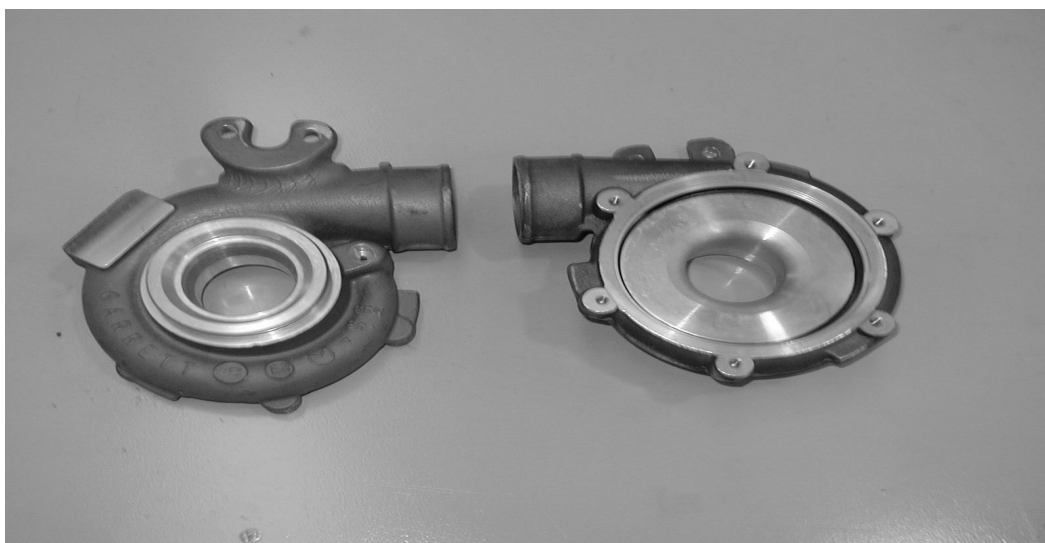
The process design and development will be explained using the example of the compressor housing shown in Fig. 1. The castings are made in Cimos foundry Roč from aluminum alloy. All the machining is done in Cimos's facility in Buzet, Croatia.

At the Cimos facility in Buzet there are five basic steps in process design and development [3]:

- feasibility study of the process,
- process planning,
- process preparation,
- trial production,
- process qualification.

The processes with a major influence on product quality have to be identified. Therefore, in process planning it is necessary to recognize and establish relevant quality requirements. And in order to determine quality requirements it is first necessary to determine:

- A process developments plan for new and modified products, along with comprehensive documented production steps and material flow.
- The production equipment and the working environment.
- Maintenance and preventive maintenance for the equipment and the working environment to ensure the availability of the production system.
- The procedures and methods for process quality assurance.
- That the operation is in accordance with production rules and standards, laws, defined responsibilities, quality management (QM)-plans, as well as customer quality requirements.



Sl. 1. Obdelan okrov kompresorja  
Fig. 1. Machined compressor housings

- opazovanje in dokumentiranje vseh parametrov postopka in karakteristik izdelka, ki mora biti na voljo vsem pristojnim službam in oddelkom;
- odobritev postopkov in opreme od vseh pristojnih oseb.

V fazi načrtovanja postopka je močno razširjena uporaba metode Analize izvora in vpliva napak (AIVP). Metoda AIVP ima velik vpliv na pripravo postopka, zato ker se izhodne veličine iz analiz AIVP uporabljajo za določanje, katere napake bi se verjetno pojavile ter kakšni popravni ukrepi so potrebni za njihovo preprečitev.

Da bi postopek razvoja in priprave postopka izdelave bil učinkovit, je treba v fazi načrtovanja postopka uporabiti še nekatera dodatna orodja, ki izhajajo iz metodologije »šest sigma«.

## 2 METODA »ŠEST SIGMA« PRI RAZVOJU POSTOPKA

V fazi načrtovanja postopka v podjetju Cimos uporabljajo metodo AIVP. Problem, ki se pri tem pojavlja pri izvajanju postopka AIVP, je v tem, da se običajno obravnava preveliko število **KVSP** (ključne vstopne spremenljivke postopka), ki nimajo velikega vpliva, včasih pa sploh ne vplivajo, na **KISP** (ključne izstopne veličine postopka).

Da bi razvoj in načrtovanje postopka potekala hitreje, je treba v fazi načrtovanja postopka uporabiti še nekatera dodatna orodja. Metodologija "šest sigma" prinaša orodja in metode, s katerimi je mogoče število KVSP zmanjšati na minimum oz. le na tiste veličine, ki imajo velik vpliv na KISP. Orodja in metode, ki pomagajo zmanjšati število KVSP ter doseganje optimalnega postopka, so prikazani na sliki 2. V prispevku je predlagana uporaba *postopkovnega mapiranja* in izdelava *vzročno-posledične matrike*.

### 2.1 Mapa postopka izdelave

Mapa postopka izdelave je grafični prikaz poteka postopka s posameznimi koraki postopka, ki prikazuje vstopne in izstopne parametre postopka ter priložnosti za njegovo izboljšanje. Vsaka postopkovna mapa naj bi bila rezultat skupinskega dela, ker je nemogoče, da bi le ena oseba imela vsa znanja o postopku.

### 2.2 Vzročno-posledična matrika

Vzročno-posledična matrika podaja zvezo med ključnimi vstopnimi ter ključnimi izstopnimi veličinami (zahteve kupcev) pri čemer uporablja mapo postopka kot osnovni vir za vstopne informacije. Ključne izstopne veličine so razvrščene glede na njihovo pomembnost, medtem ko so ključne vstopne veličine izračunane iz medsebojnih odvisnosti vstopnih in izstopnih veličin [6].

- The monitoring and documenting of all process parameters and product characteristics, available to all competent services and departments.
- The approval for processes and equipment from all the responsible persons.

In the process planning stage the Failure mode and effect analysis (FMEA) method is widely used. The process FMEA method has great influence and significance on process preparation because outputs from the FMEA analysis are used to determine which failures are likely to appear and what corrective actions are necessary for failure prevention.

In order to have efficient process design and development some additional tools and methods should be used in the process planning phase. These tools can be derived from Six Sigma methodology.

## 2 SIX SIGMA METHODS IN PROCESS DESIGN

In the process planning phase in Cimos facilities the FMEA method is widely used. The problem that emerged with the application of the FMEA method is the large number of KPIV (Key Process Input Variables) that do not have a significant influence or have no influence on KPOV (Key Process Output Variables).

To have faster and more effective process design and development in the process planning stage it is necessary to apply some additional tools. Six Sigma methodology brings tools and methods with which the number of KPIV can be reduced to a minimum, or to those variables which have a major influence on KPOV. Tools and methods that help to decrease the number of KPIV and achieve an optimized process are shown in Fig. 2. In this paper the applications of process map and the cause-and-effect matrix are proposed.

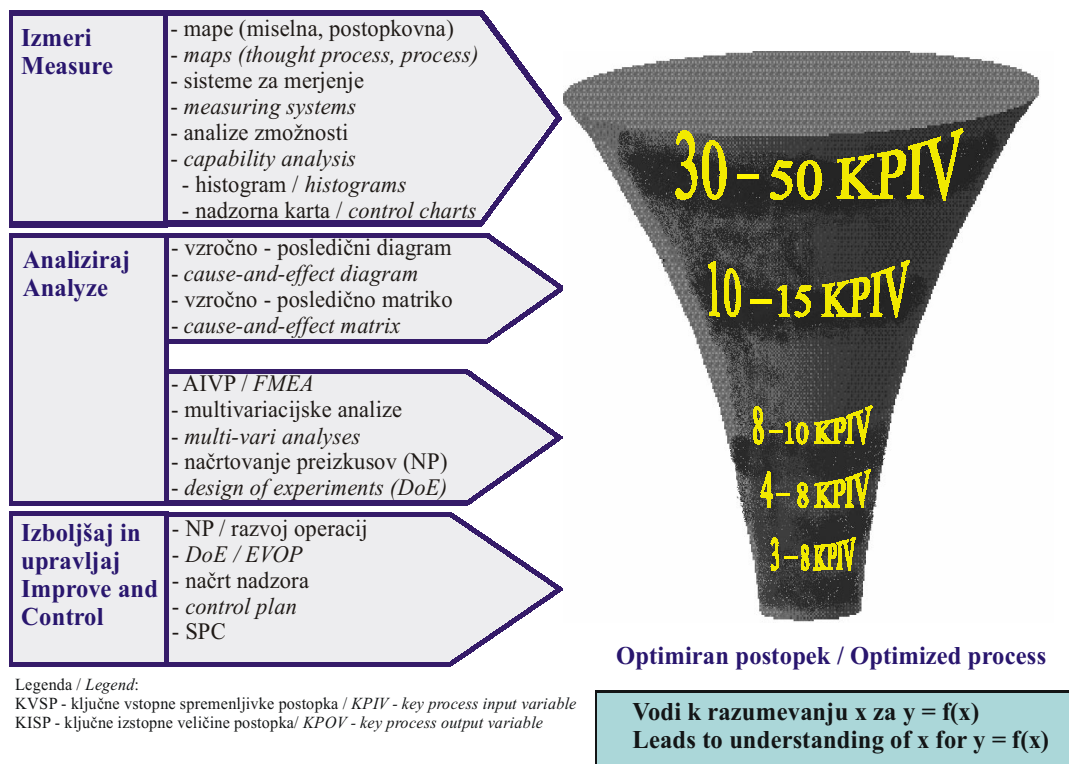
### 2.1 Process map

In general, a process map is a graphical representation of a process flow that identifies the steps of the process, the input and output variables of a process and the opportunities for improvements. Every process map should be the result of teamwork, because it is impossible that just one person could have all the knowledge about the process.

### 2.2 The cause-and-effect matrix

A cause-and-effect matrix relates the key inputs to the key outputs (customer requirements) using a process map and a cause-and-effect diagram as the primary source of the input information. The key outputs are rated according to their importance, while the key inputs are scored in terms of their relationship to the key outputs [6].





Sl. 2. Orodja in metode za optimizacijo postopka izdelave  
 Fig. 2. Tools and methods in process optimization

Pri uporabi vzročno-posledične matrike sta značilni dve fazi. V prvi fazi so vstopni parametri povezani z izstopnimi, kar določa osnovo za analizo Pareto. V drugi fazi pa oblikujemo novo vzročno-posledično matriko s tremi oz. štirimi kritičnimi vstopnimi parametri iz matrike v prvi fazi.

V matriki je faktor pomembnosti za vsak parameter posebej razvrščen, vsak naštetih vstopni parameter pa je povezan z vsakim izstopnim parametrom. Končna vrednost za vsak parameter je dobljena z množenjem nivoja pomembnosti z vrednostjo, ki je bila pripisana posameznim parametrom, ter s seštevanjem (vodoravno) prek vseh parametrov.

Da se prepričamo o nivoju vpliva parametrov, bo v nadaljevanju uporabljena analiza Pareto. Diagram Pareto jasno prikaže informacijo o relativni pomembnosti parametrov obravnavanega problema. Ta informacija pomaga razpoznati najpomembnejše parametre, ki bodo analizirani najprej. V diagramu Pareto se tudi jasno pokažejo področja mogočih izboljšav.

Pri uporabi vzročno-posledične matrike so vsi KVSP razvrščeni glede na pomembnost spremenljivke. Rezultati, dobljeni z vzročno-posledično matriko, se lahko uporabijo za različne analize in optimizacije, kakor so AIVP, multivariacijska analiza ter načrtovanje preizkusov.

In the application of a cause-and-effect matrix there are two phases. In the first phase the inputs are correlated to the outputs that provide the basis for a Pareto analysis. In the second phase, a new cause-and-effect matrix is started with three or four critical inputs from the first-phase matrix.

In the matrix a factor of importance for each parameter is rank ordered and every listed input parameter is correlated to every output parameter. Finally, a total value for each parameter is obtained by multiplying the rating of importance with the value given to the parameters and adding across for each parameter.

To be very certain about the level of a parameter's influence an additional Pareto analysis is applied. The Pareto diagram clearly displays information about the relative importance of the factors of a certain problem. This information helps to identify the most important factors, which will be analyzed first. With the help of the Pareto diagram domains, of possible improvement are clearly identified.

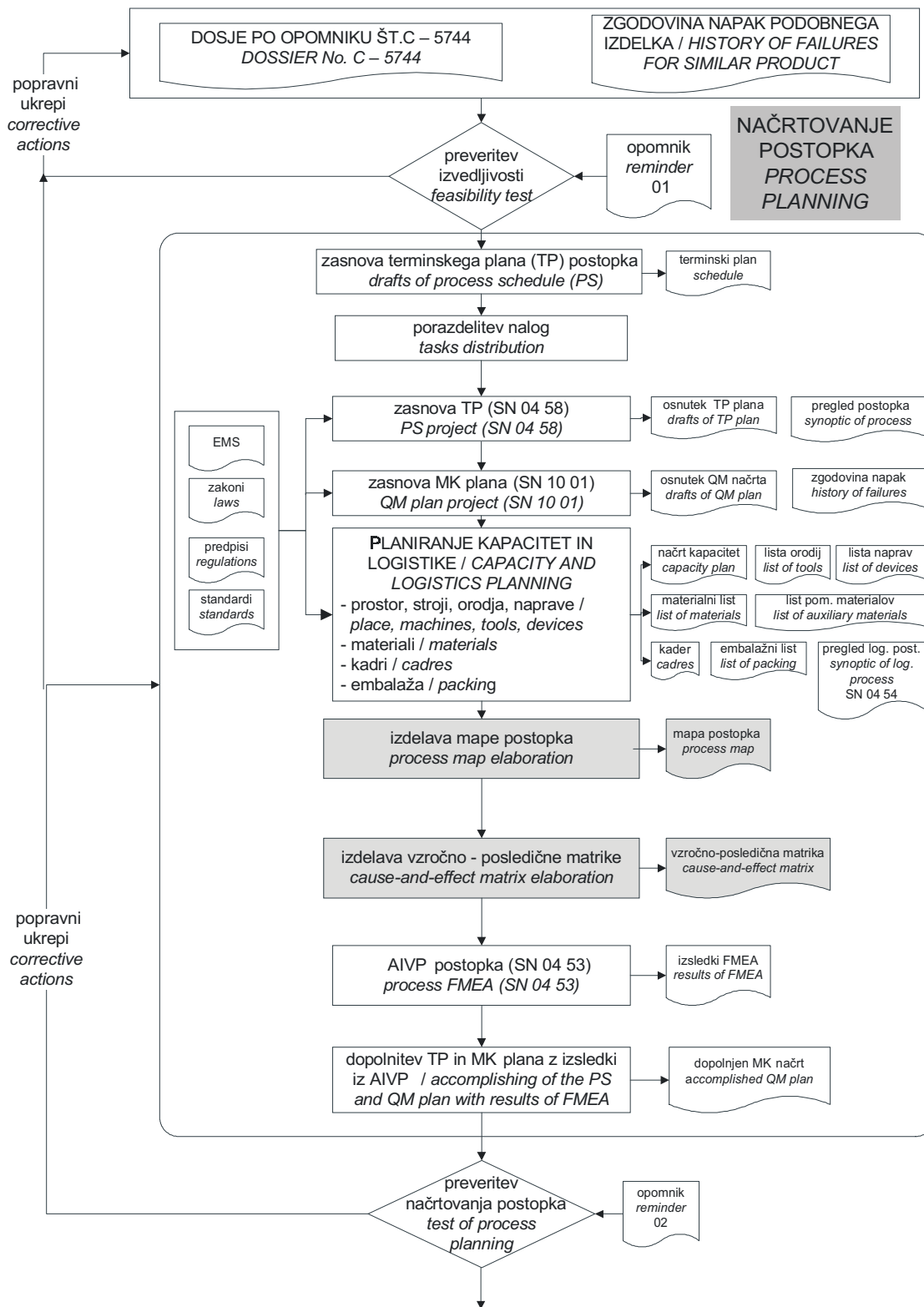
Using a cause-and-effect matrix all the KPIV can be rank ordered with respect to the importance of the variable. The results obtained with the cause-and-effect matrix can be used for other analyses and optimizations such as FMEA, multi-vari analysis and design of experiments.

### 2.3 Prilagojena oblika poteka postopka

### 2.3 Modified process design flow

Predlog prirejenega sinoptika načrtovanja postopka izdelave je prikazan na sliki 3.

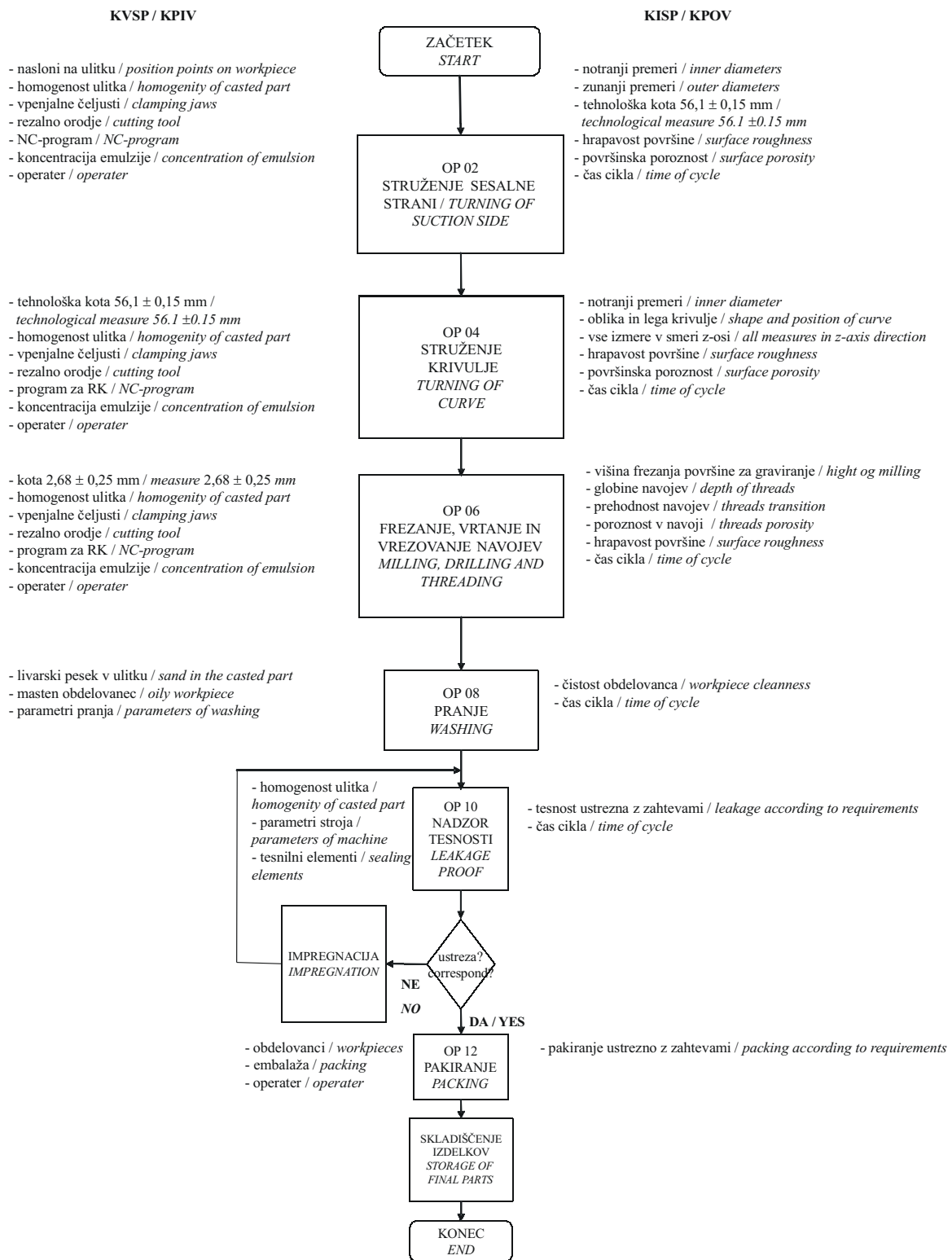
By applying the presented method at the process planning stage the process-design flow is modified, Fig. 3.



Sl. 3. Modificirana oblika poteka postopka izdelave  
 Fig. 3. Modified process-design flow

Nova, prilagojena mapa postopka za potek izdelave okrova kompresorja, skupaj z vsemi KVSP in KISP, je prikazana na sliki 4.

A new, modified process map for compressor-housing production is developed and shown in Fig. 4, along with all the KPIV and KPOV.



Sl. 4. Modificirana mapa postopka za potek izdelave okrova kompresorja  
 Fig. 4. Modified process map for compressor-housing production

Na sliki 4 so KVSP našeti na levi strani diagrama, medtem ko so KISP podani na desni strani diagrama. Včasih so KISP pri enem opravilu obenem tudi KVSP za naslednje opravilo, kakor v primeru opravil OP 02 in OP 04. Našeti KVSP in KISP v mapi postopka bodo uporabljeni kot vstopni parametri za analizo v vzročno-posledični matriki (sl. 5).

Rezultati iz vzročno-posledične matrike so v nadaljevanju analizirani v diagramu Pareto. KISP so razvrščeni v skladu s številom točk iz vzročno-posledične matrike. Diagram Pareto za najbolj vplivne KISP je prikazan na sliki 6.

KVSP so analizirani na enak način kakor KISP (sl. 7).

In Fig. 4 the KPIV are listed on the left-hand side, while the KPOV are listed on the right-hand side of the diagram. In some cases the KPIV from one step are the KPOV for the next step, for example OP 02 and OP 04. The KPIV and KPOV listed in the process map will be used as inputs for the analysis in the cause-and-effect matrix, shown in Fig. 5.

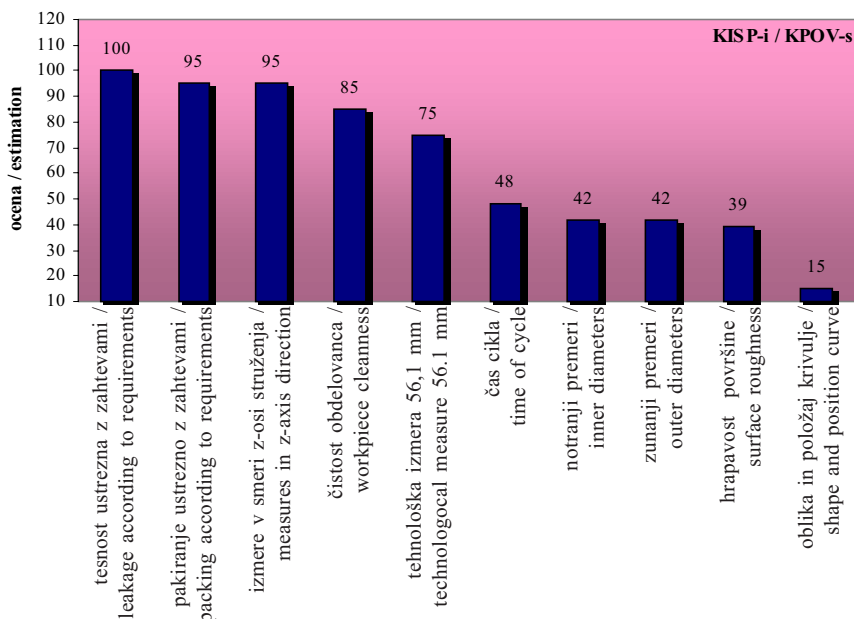
The results the cause-and-effect matrix are further analyzed with the Pareto diagram. The KPOV are rank ordered in accordance with the number of points from the cause-and-effect matrix. The Pareto diagram for the most influential KPOV is shown in Fig. 6.

The KPIV are analyzed in the same manner as the KPOV, Fig. 7.

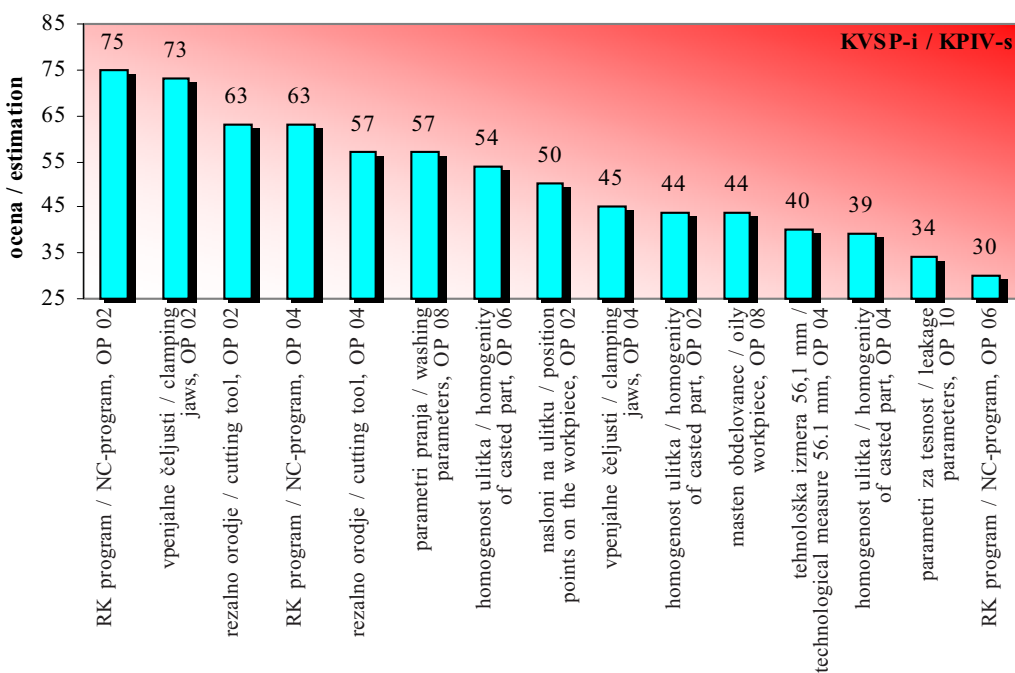
Ocena pomembnosti za odjemalca procesa / Importance of estimation for process customer		3	3	5	3	1	3	3	5	1	1	3	3	5	5	5	Skupaj Sum
Tek. št. / cur. No.		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
Tek. št. / Cur. No.	OPERACIJA V PROCESU / PROCESSING OPERATION	KISP / KPOV															
		notranji premeri / inner diameters	zunanjí premeri / outer diameters	tehnološka kota 56,1 mm / technological measure 56.1 mm	hrapavost površine / surface roughness	površinska poroznost / surface porosity	čas cikla / time of cycle	oblika in položaj krivulje / shape and position of curve	kote v smeri z-osi smuženja / measures in the z-axis direction	višina površine za graviranje / height of milled surface	globine navojev / depth of threads	prehodnost navojev / transition of threads	poroznost v navojih / porosity of threads	čistota obdelovanca / workpiece cleanliness	tesnost ustreza z zahtevami / leakage according to requirements	pakiranje ustrežno z zahtevami / packing according to	
1	02	nasloni na ulitku / position points on workpiece	0	0	5	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	50
2	02	homogenost ulitka / homogeneity of casted part	0	0	1	3	5	0	0	0	0	0	0	0	5	0	44
3	02	vpenjalne čeljusti / clamping jars	5	5	5	1	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	73
4	02	rezalno orodje / cutting tool	5	5	1	3	1	1	0	3	0	0	0	0	0	0	63
5	02	program za RK / NC-program	3	3	3	3	0	5	0	3	0	3	0	0	0	0	75
6	02	konzentracija emulzije / emulsion concentration	1	1	0	3	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	20
7	02	operater / operator	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	1	0	0	14
8	04	tehnološka kota 56,1 mm / technological measure 56.1 mm	0	0	0	0	0	0	5	5	0	0	0	0	0	0	40
9	04	homogenost ulitka / homogeneity of casted part	0	0	0	3	5	0	0	0	0	0	0	0	5	0	39
10	04	vpenjalne čeljusti / clamping jars	5	0	0	0	0	0	5	3	0	0	0	0	0	0	45
11	04	rezalno orodje / cutting tool	5	0	0	3	0	1	5	3	0	0	0	0	0	0	57
12	04	program za RK / NC-program	3	0	0	3	0	5	5	3	0	0	0	0	0	0	63
13	04	konzentracija emulzije	1	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	17
14	04	operater / operator	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	1	0	0	14
15	06	kota 2,68 mm / measure 2.68 mm	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	5
16	06	homogenost ulitka / homogeneity of casted part	0	0	0	3	5	0	0	0	0	0	5	0	5	0	54
17	06	vpenjalna naprava / clamping device	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	2
18	06	rezalno orodje / cutting tool	0	0	0	0	0	0	0	1	3	0	0	0	0	0	4
19	06	program za RK / NC-program	0	0	0	3	0	5	0	3	3	0	0	0	0	0	30
20	06	konzentracija emulzije / emulsion concentration	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	5
21	06	operater / operator	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	1	0	0	20
22	08	livarski pesek v ulitku / sand in the casted part	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	25
23	08	masten obdelovanec / oily workpiece	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	5	1	1	44
24	08	parametri pranja / washing parameters	0	0	0	0	0	3	0	0	0	1	0	5	1	3	57
25	10	homogenost ulitka / homogeneity of casted part	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	25
26	10	parametri tesnosti / leakage parameters	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	5	0	34
27	10	tesnilni elementi / sealing parameters	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	3	0	18
28	12	končani obdelovanci	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	25
29	12	embalaža / packing	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	25
30	12	operater / operator	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	25
Skupaj / Sum		42	42	75	39	6	48	15	95	1	9	12	0	85	100	95	

Sl. 5. Vzročno-posledična matrika za postopek izdelave okrova kompresorja  
Fig. 5. Cause-and-effect matrix for compressor-housing production





Sl. 6. Diagram Pareto za KISP  
Fig. 6. Pareto diagram for the KPOV



Sl. 7. Diagram Pareto za KVSP  
Fig. 7. Pareto diagram for the KPIV

### 3 PRIMERJAVA SEDANJEGA IN NOVEGA POTEKA POSTOPKA

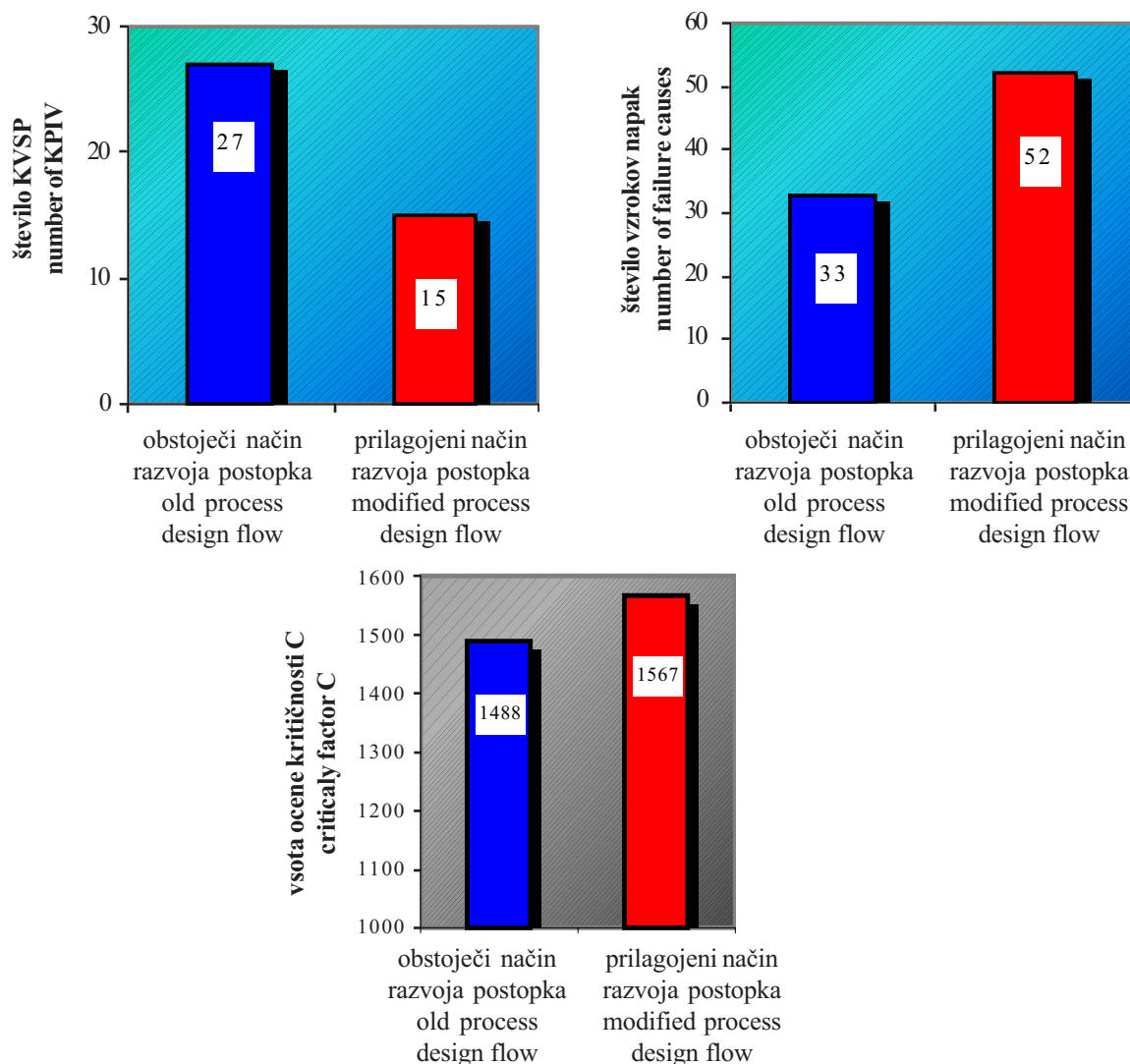
Za primerjavo med sedanjim in novim načinom razvoja postopka bodo v nadaljevanju analizirani parametri, to so: število KVSP, število vzrokov napak v AIVP-postopku ter faktor ocene kritičnosti "C".

S slike 8 je razvidno, da je pri sedanjem načinu razvoja postopka obravnavano večje število KVSP. Pri tem je to število KVSP zajelo celo manjše število vzrokov napak kakor pri novem načinu. Pri primerjavi se še opaža, da je

### 3 COMPARISON OF THE OLD AND THE MODIFIED PROCESS-DESIGN FLOW

To compare the old and the modified process-design flow, the number of KPIV, the number of failure causes in the FMEA analysis, and the criticality factor, both in the old and the modified process-design flow, will be analyzed.

As shown in Fig. 8, in the old process-design flow there were greater numbers of KPIV. At the same time the number of failure causes analyzed in the old process-design flow was significantly lower than in the modified one. Furthermore, the criticality factors



Sl. 8. Primerjava parametrov med sedanjim in novim razvojem poteka postopka  
 Fig. 8. Comparisons of the old and the modified process-design flow

vsota ocen kritičnosti "C" pri novem načinu razvoja postopka večja. To pomeni, da je z manjšim številom KVSP odkritih več mogočih vzrokov za napake, na katere lahko preprosto korektivno delujemo in s tem preprečimo dejansko nastajanje napak v postopku proizvodnje.

Če primerjamo uporabljen čas in stroške, lahko ugotovimo, da so razmere malo drugačne. Analiza porabljenega časa za oba poteka postopka je prikazana na sliki 9, medtem ko slika 10 prikazuje analizo stroškov.

S slike 9 je razvidno, da je za pripravo po novem načinu razvoja postopka uporabljeno več časa, približno 42,5 %. Hkrati so po novem načinu (sl. 10) stroški večji.

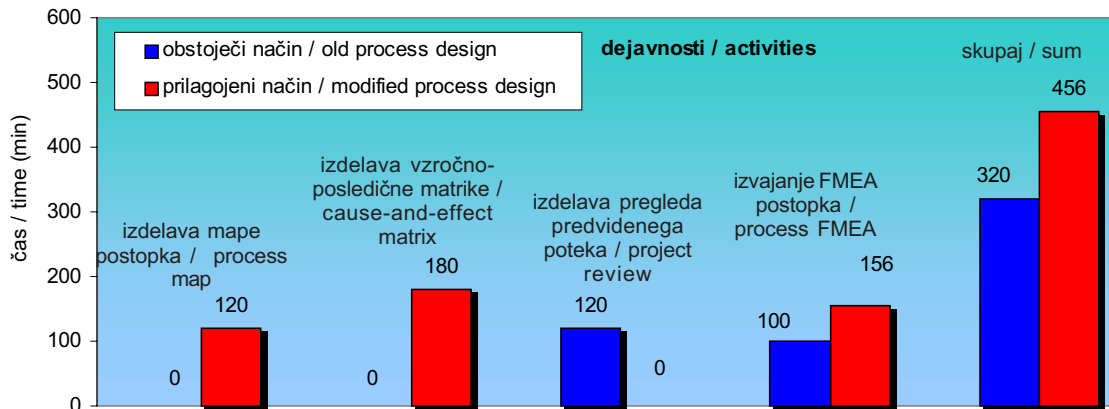
Dejansko sliko novega načina poteka postopka dobimo, če le-tega projeciramo na enomesečno proizvedeno količino. Na sliki 11 so podani dejanski stroški slabe kakovosti za enomesečno proizvodnjo okrovov kompresorja.

are greater in the modified than in the old process-design flow. In the modified process-design flow with a smaller number of KPIV there are a greater number of failure causes determined which could be easily acted upon, corrective action defined and the appearance of failure in production prevented.

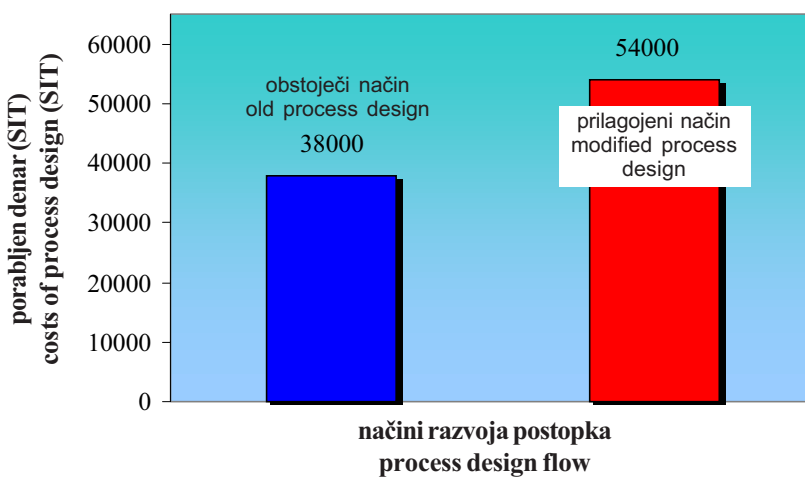
The results of these analyses are slightly different if we analyze the times spent and the costs. Time analyses for both process-design flows are shown in Fig. 9, while the cost analyses are shown in Fig. 10.

From Fig. 9 it can be concluded that in the modified process-design flow more time is used: approximately 42.5 %. At the same time, in the modified process-design flow more money is spent. The costs were greater in the modified than in the old process-design flow.

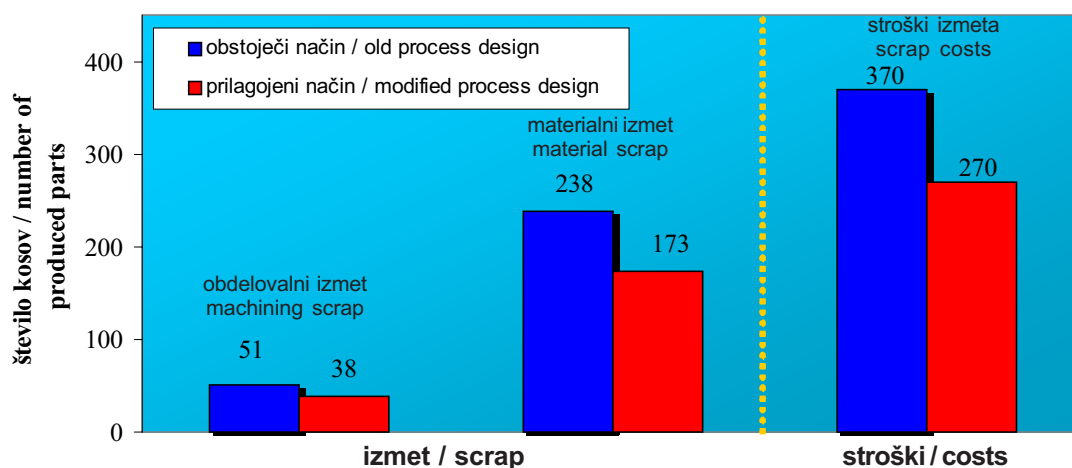
A true picture can be obtained by projecting a modified process-design flow on a one-month production volume. Fig. 11 shows the real poor-quality costs of one month's compressor-housing production.



Sl. 9. Analiza porabljenega časa za sedanji in novi način poteka postopka  
 Fig. 9. Spent-time analysis of the old and the modified design flow



Sl. 10. Analiza stroškov za sedanji in novi način poteka postopka  
 Fig. 10. Costs analysis of the old and the modified design flow



Sl. 11. Stroški slabe kakovosti pri enomesečni proizvodnji okrovov kompresorja  
 Fig. 11. Poor-quality costs of one month's compressor-housing production

Ob upoštevanju večjih stroškov novega načina poteka postopka ter prihrankov na račun manjšega obdelovalnega in materialnega izmeta v proizvodnji lahko dosežemo znaten celoten prihranek pri uvajanju novega načina.

Taking into account the higher costs of the modified process-design flow and the savings in machining and materials scrap in production, a significant overall saving can be achieved by the application of the modified process-design flow.

## 4 SKLEPNE UGOTOVITVE

Razvoj postopka, posebej faza načrtovanja postopka je zelo pomembna faza v pripravi proizvodnje avtomobilskih delov. Zaradi velikih serij izdelkov tudi majhni odstotki izmeta povzročajo ogromne stroške. Najmanj, kar lahko naredimo v fazi načrtovanja postopka, je, da uporabimo orodja za izboljšanje postopka, tj. mapo postopka izdelave in vzročno-posledično matriko.

Iz pričujočega prispevka je razvidno, da uporabljeni orodji odkrivata veliko število možnih vzrokov za napake, na katere se lahko deluje in s tem prepreči nastajanje napak v postopku proizvodnje. Za uporabo metode AIVP po novem načinu poteka postopka je bilo porabljeno več časa kakor pri sedanjem načinu. Poleg tega sta bila tudi razvoj in priprava novega poteka postopka precej dražja. Vendar je ocena, da bi z zmanjšanjem stroškov obdelovalnega ter materialnega izmeta (v takšnem obsegu) pokrili vse dodatne stroške v fazi priprave; še več, dosegli bi prihranke, ki bi bili nekajkrat večji, kakor je začetno povečanje stroškov.

Sklenimo z ugotovitvijo, da celo uporaba posameznih, izoliranih orodij iz metodologije »šest sigm« zagotavlja koristi v izboljšanju postopka. Ti rezultati bodo še boljši s širšo uporabo orodij »šest sigm« in metodologije v celoti.

## 4 CONCLUSION

Process design and development, especially the process planning stage, is a very important phase in the preparation or automotive-part production. Due to the very high production volume, even low scrap levels result in high costs.

What we can do in the process planning stage is to apply process-improvement tools such as a process map and a cause-and-effect matrix.

From this study it is evident that the applied tools detect a greater number of possible failure causes, so that failures in the production process can be prevented. With the application of the FMEA method more time is spent in the new than in the old process flow. Furthermore, the new process design and development is more costly than the old one. Hence, due to better production preparation the machining and material scrap will be decreased to such a level as to cover all the additional costs in the preparation stage and, furthermore, to produce savings that are several times greater than the initial cost increase.

In conclusion, even the application of some isolated tools from Six Sigma methodology provide benefits in process improvement. These results could be improved with more widespread use of Six Sigma tools and methodology.

## 5 LITERATURA

## 5 REFERENCES

- [1] Tadikamala, P. (1994) The confusion over Six Sigma quality, *Quality Progress*, No 11.
- [2] Smith, G. (1993) Benchmarking success at Motorola, *Copyright Society of Management Accountants of Canada*.
- [3] Breyfogle III, F. W., et al. (1999) Managing Six Sigma, *John Wiley & Sons, Inc.*, New York.
- [4] Fortenot, F, et al. (1994) Six Sigma in customer satisfaction, *Quality Progress*, No 12.
- [5] Pavletić, D., M. Soković (2002) Six Sigma: A complex quality initiative, *J. of Mech. Eng.*, Vol. 48, No 3.
- [6] Fakin, S., M. Soković (2001) Use of Six sigma method in the automotive parts production development process, Diploma thesis No. S-556, Faculty of Mechanical Engineering, University of Ljubljana (in Slovene).

Naslovi avtorjev: mag. Duško Pavletić  
Univerza v Rijeki  
Tehnična fakulteta  
Vukovarska 58  
HR-51000 Rijeka, Hrvaška

Sandro Fakin  
CIMOS d.d.  
PC1 Buzet, Hrvaška

doc.dr. Mirko Soković  
Univerza v Ljubljani  
Fakulteta za strojništvo  
Aškerčeva 6  
1000 Ljubljana  
mirko.sokovic@fs.uni-lj.si

Authors' Addresses: Mag. Duško Pavletić  
University of Rijeka  
Faculty of Engineering  
Vukovarska 58  
HR-51000 Rijeka, Croatia

Sandro Fakin  
CIMOS Ltd.  
PC1 Buzet, Croatia

Doc.Dr. Mirko Soković  
University of Ljubljana  
Faculty of Mechanical Eng.  
Aškerčeva 6  
1000 Ljubljana, Slovenia  
mirko.sokovic@fs.uni-lj.si

Prejeto:  
Received: 14.8.2003

Sprejeto:  
Accepted: 8.4.2004

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



## Krmiljenje hladilnih sistemov

### Control in Refrigeration Systems

Janez Primožič - Rajko Svečko

*Prispevek predstavlja krmiljenje hladilnih sistemov. Namen raziskave je pomoč pri projektiranju hladilnih sistemov oziroma pri določevanju optimalnih parametrov, ki vplivajo na delovanje hladilnih sistemov. Za obravnavo je bila potrebna analiza trenutnega stanja ponudnikov oziroma izdelovalcev opreme za krmiljenje hladilnih sistemov. Opremo lahko delimo na dva dela. Obstaja oprema za krmiljenje preprostih hladilnih sistemov, ki se največkrat sestoji iz elektronskih termostatov za krmiljenje elementov v hladilnih komorah ali miniaturnih mikroprocesorskih naprav za krmiljenje manjših kompresorskih agregatov. Uporaba našete opreme je postala že širokoporabna, tako da sta njena prednost nizka cena in preprosta uporaba. Slabe lastnosti omenjene opreme pa so predvsem neuporabnost za zahtevnejše hladilne sisteme ter nezmožnost optimizacije hladilnih sistemov v smislu povečevanja hladilnega števila in varčevanja z električno energijo.*

*Poudarek prispevka je zaradi naštetih dejstev predvsem v krmiljenju zahtevnejših hladilnih sistemov z uporabo prostoprogramljivih mikroprocesorjev in sistema SCADA.*

© 2004 Strojniški vestnik. Vse pravice pridržane.

**(Ključne besede: sistemi hladilni, sistemi krmilni, naprave krmilne, sistemi SCADA)**

*This paper describes the control of refrigeration systems. The goal of the research is to support the design of refrigeration systems and to define the optimum parameters that influence refrigerating systems. A second aim of the investigation was an analysis of currently available control equipment for refrigeration systems and the producers. The equipment can be divided into two segments: equipment for the control of simple refrigeration systems, which consists of electronic thermostats for controlling the elements of the refrigeration rooms; and miniature microprocessor-based equipment used for controlling the smallest compressor aggregates. The advantages of this equipment are its wide consumption, low cost and simple usage. Its drawbacks are inappropriateness for complex refrigeration systems in the sense of increasing the coefficient of performance (COP) and the consumption of electrical energy.*

*The main emphasis of the paper is on the control of complex refrigeration systems based on programmable microprocessors and SCADA (supervisory control and data acquisition) systems.*

© 2004 Journal of Mechanical Engineering. All rights reserved.

**(Keywords: refrigeration systems, control systems, control equipment, SCADA systems)**

#### 0 UVOD

Hladilni sistemi, ki jih prispevek obravnava, so parni krožni postopki na podlagi Carnotovega hladilnega krožnega postopka ([1] do [3]). Tehnologije izdelave hladilnih strojev so na področju strojništva dobro znane, ker pa je krmiljenje močno povezano s področjem avtomatike, se pojavlja potreba po poglobljenem razumevanju delovanja krmilnih sistemov hladilnih naprav. Z vidika strojništva pomeni razumevanje avtomatike izraba vseh prednosti, s katerimi lahko izboljšamo delovanje hladilnih sistemov. Z vidika avtomatike je razumevanje fizikalnega ozadja

#### 0 INTRODUCTION

The refrigeration systems dealt with in this article employ vapour-cycle processes based on the Carnot refrigeration cycle ([1] to [3]). In mechanical engineering, the technology of producing refrigeration machines is well known, however, their control is closely connected to automation. Therefore, it is vital to go into further details on the working process of the control system of refrigeration machines. To really understand automation, from the point of view of mechanical engineering, means to make good use of the advantages by which the work of refrigeration systems can be improved. From the automation point of view, for

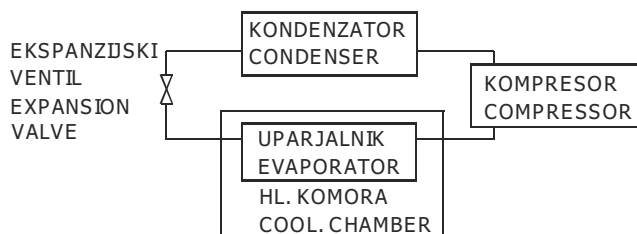
delovanja hladilnih sistemov pogoj za kakovostno izdelano krmilje.

Prispevek opisuje načine krmiljenja neposrednih in posrednih hladilnih sistemov. Izdelana je primerjava med krmiljenjem z uporabo namenskih elektronskih termostatov in prostoprogramljivih mikropostopkorskih krmilnikov. Glavni del obravnave je namenjen predstavitvi krmiljenja hladilnih sistemov s prostoprogramljivimi mikroprocesorskimi krmilniki [8]. Rezultat obravnave so algoritmi, ki omogočajo optimalno krmiljenje zahtevnih hladilnih sistemov, tako na ravni kompresorskega agregata kakor tudi elementov v samem prostoru, ki ga hladimo.

## 1 HLADILNI SISTEMI

Hladilne sisteme lahko glede na način prenosa toplote delimo na neposredne in posredne. Razlog navedbe teh dveh tipov hladilnih sistemov je v tem prispevku prav ta, da se krmiljenje enega in drugega načina razlikuje.

**Neposredni hladilni sistem** sestavljajo glavni štirje elementi: kompresor ali sklop kompresorjev, kondenzator, ekspanzijski ventil in uparjalnik oziroma sklop uparjalnikov. Celoten sistem je napolnjen z enim hladivom. Krmiljenje takšnega sistema bo opisano v naslednjih poglavjih.



Sl. 1. *Neposredni hladilni sistem*  
Fig. 1. *The direct refrigeration system*

**Posredni hladilni sistem** je sistem sestavljen iz dveh delov. Primarni del je zelo podoben neposrednemu sistemu, le da uparjalnik namesto zraka hladi sekundarno hladivo, to je hladilna mešanica vode in propilen glikola ali etilen glikola [4]. V sekundarnem delu pa v hladilniku zraka s kroženjem hladnega sekundarnega hladiva, hladimo zrak v hlajenem prostoru (hladilni komori).

Postopek, ki pri neposrednem hladilnem sistemu za hlajenje zraka poteka v hlajenem prostoru, pri posrednem sistemu poteka v uparjalniku za hlajenje sekundarnega hladiva. Hladivo torej v primarnem delu uparjalnika prehaja v plinasto fazo in pri tem odvzema toploto sekundarnemu hladivu v sekundarnem delu uparjalnika. Sekundar uparjalnika tako hladi hladilno mešanico, ki jo imamo na želenem temperaturnem režimu stalno pripravljeno v zbiralniku hladilne mešanice.

qualitative control, it is vitally important to understand the physical background to refrigeration systems.

The article describes methods of control for direct and indirect refrigeration systems. A comparison has been made between control using electronic thermostats and control using programmable controllers. The main part of the discussion is the presentation of control using programmable microprocessor controllers [8]. This results in algorithms that enable optimum control of complex refrigeration systems at the level of compressor aggregates as well as the elements in the cooled room.

## 1 REFRIGERATION SYSTEMS

Depending on the way the heat is transmitted, refrigeration systems can be put into two categories: direct and indirect. The reason for discussing these two is the fact that the control of the first differs from the control of the second.

**The direct refrigeration system** consists of four elements: a compressor (or a set of compressors), a condenser, an expansion valve and an evaporator (or a set of evaporators). The entire system is filled with a single refrigerant. The control of this kind of system is described later.

**The indirect refrigeration system** consists of two parts. The first part resembles the direct system, it is different only in that the evaporator cools a secondary medium instead of air. The secondary medium is a cooling mixture of water and propylene glycol or ethylene glycol [4].

The phenomenon which occurs in the evaporator (in the cold store) in the direct system, takes place in the cooling-mixture evaporator in the indirect system. The transition of the refrigerant into a gas takes place in the cooling-mixture evaporator where it decreases the heat of the cooling mixture that is going through the exchanger. The secondary circuit of the heat exchanger cools the cooling mixture, which is maintained at the desired temperature in the reservoir.

Na ravni hladilne komore imamo hladilnik, ki je po obliki podobno uparjalniku. Ne moremo ga imenovati uparjalnik, saj se v njem ne opravlja uparjanje. Hladilna mešanica potuje skozi hladilnik in na ta način odvzema toploto hlajenemu prostoru – komori. V bližini hladiva, najpogosteje pa kar zunaj komore, imamo naslednje elemente za krmiljenje temperature v komori:

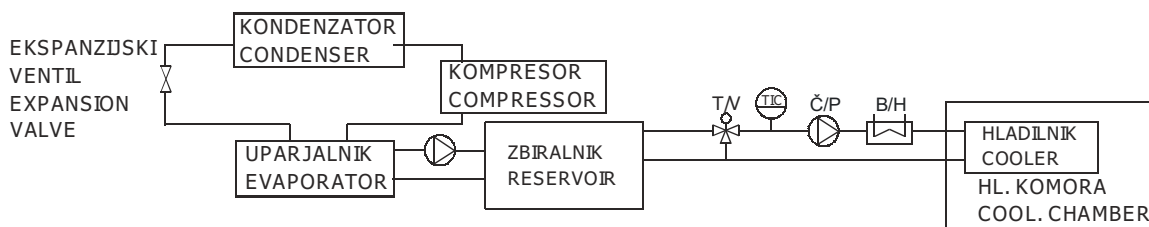
- črpalko hladilne mešanice Č,
- tripotni ventil hladilne mešanice T,
- temperaturno zaznavalo hladilne mešanice TIC,
- boljer z grelcem za odtaljevanje hladilnika z zaščitnim termostatom B.

Krmiljenje elementov na primarni strani prenosnika toplote poteka enako kakor pri neposrednem sistemu, medtem ko ima krmiljenje sekundarnega dela svoje posebnosti, ki bodo predstavljene v nadaljevanju.

In the cold store there is a cooler, which is a similar shape to the evaporator. However, it cannot be called an evaporator, because there is no evaporation occurring inside it. The cooling mixture flows through the cooler and, in this way, decreases the temperature of the chamber that is being cooled. Near the cooler or, frequently, outside the chamber, there are the following elements for controlling the temperature of the chamber:

- a pump for the cooling mixture P,
- a three-way valve for the cooling mixture V,
- a temperature probe for the cooling mixture TIC,
- a boiler with a heater for defrosting the cooler (with a protection thermostat H).

The element control on the primary circuit of the heat exchanger works the same as in the direct system, while the secondary-circuit control has its specific features, dealt with later on in the article.



Sl. 2. Posredni hladilni sistem  
Fig. 2. The indirect refrigeration system

## 2 KRMILJENJE HLADILNIH SISTEMOV

## 2 CONTROL IN REFRIGERATION SYSTEMS

### 2.1 Krmiljenje preprostega hladilnega sistema

### 2.1 Simple refrigeration system control

Preprosti hladilni sistem, delujoč po načelu uparjanja in kompresije hladiva, je sestavljen iz kompresorja, kondenzatorja, uparjalnika in ekspanzijskega ventila.

The simple refrigeration system, which works by the evaporation and refrigerant compression principle, consists of the compressor, the condenser, the evaporator and the expansion valve.

Krmiljenje opisanega preprostega hladilnega sistema je v praksi večinoma izvedeno z elektronskimi termostati. Elektronski termostat s temperaturnim tipalom dobiva podatek o temperaturi v hladilni komori. Glede na izmerjeno temperaturo in v samem elektronskem termostatu nastavljeno zeleno temperaturo vključuje elemente hladilnega sistema. Če se temperatura v komori zviša nad zeleno temperaturo s pozitivno razliko, se vključi hlajenje. To pomeni, da elektronski termostat vklopi kompresor, ventilatorje kondenzatorja, polnilni ventil ter ventilatorje uparjalnika. Po doseženi zeleni temperaturi v komori se naštetni elementi hkrati izklopijo, dokler ni ponovne potrebe po hlajenju.

In practice, the described simple refrigeration system is executed with the help of electronic thermostats. The electronic thermostat obtains the information on temperature in the cold store with the help of the temperature probe. It switches on elements of the cooling system in accordance with the measured temperature and the set temperature in the electronic thermostat. As the temperature in the chamber rises above the desired temperature plus the difference, the cooling is switched on. In other words, the electronic thermostat switches on the compressor, the fans of the condenser, the expansion valve, and the fans of the evaporator. As the desired temperature in the chamber is reached, these elements are switched off simultaneously, and stay off until the next cooling situation.

Kakor je bilo omenjeno že v prejšnjih poglavjih, je treba uparjalnik redno odtaljevati. V ta namen ima elektronski termostat možnost nastavitve parametrov odtaljevanja. Tako lahko izbiramo med naslednjimi nastavitvami:

- časom med odtaljevanji (ta čas je lahko dejanski čas ali čas delovanja hlajenja in znaša od štiri do osem ur, kar je odvisno od skladiščenega blaga oziroma odprtosti vrat hladilne komore);
- najdaljše trajanje odtaljevanja;
- temperaturo na lamelah uparjalnika, ki izklopi odtaljevanje;
- čas odcejanja po odtaljevanju (to je čas, ko električni grelniki ne delujejo več in se kapljice le še odcedijo iz uparjalnika);
- zakasnitev ventilatorjev po odcejanju (kapljice vode, ki so se zaradi odtaljevanja pojavile na uparjalniku, bi z vklopom ventilatorjev razpršilo po prostoru in blagu, ki ga hladimo. Navzlic temu najprej za kratek čas vklopimo hlajenje brez ventilatorjev uparjalnika in tako dosežemo, da kapljice na uparjalniku zamrznejo in se ne razpršijo po prostoru.).

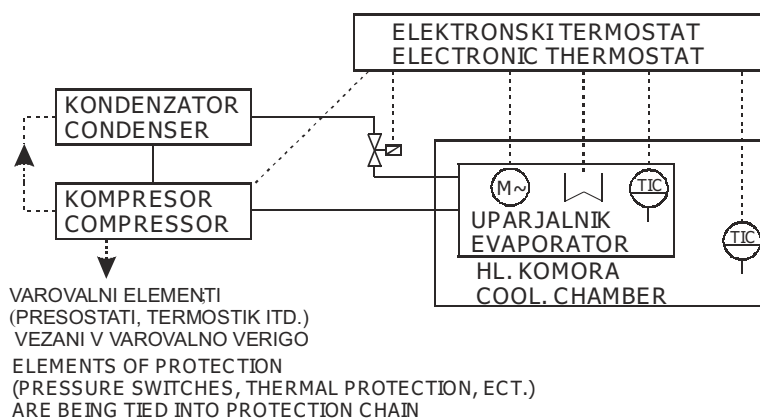
Pri navedenem krmiljenju hladilnega sistema ne moremo govoriti o kakršnikoli optimizaciji sistema v pomenu povečevanja hladilnega števila oziroma povečevanju energijske učinkovitosti.

The evaporator must be defrosted regularly. For this reason, it is possible to set the defrosting parameters on the electronic thermostat.

We can choose among the following settings:

- the time period between the defrosting acts (the actual time or the cooling period time; that is somewhere between four and eight hours, depending on the stored goods or the period of time the doors of the cold store are open)
- the maximum duration of the defrosting process
- the temperature on the evaporator fins, which switches off the defrosting process
- the dripping time after the defrosting act (the time when the electric heaters have stopped working and the drops are dripping out of the evaporator)
- the fan delay after dripping time (the drops of water which appear on the evaporator would be sprayed about the cold store and across the goods by switching on the fans. Instead, we switch on the cooling without the fans of the evaporator first, and ensure that the drops freeze on the evaporator and are not sprayed about.)

With this kind of refrigeration system control, we cannot speak about optimizing the system in the sense of increasing the COP or the energy efficiency.



Sl. 3. Shema enostavnega hladilnega sistema s pripadajočim krmiljenjem  
Fig. 3. A scheme of the simple refrigeration system and its control

## 2.2 Krmiljenje zapletenega neposrednega hladilnega sistema

Zapleteni hladilni sistem se v primerjavi s preprostimi hladilnimi sistemi razlikuje v naslednjem:

- sestavlja ga večje število hladilnih komor oziroma uparjalnikov,
- sestavlja ga večje število kompresorjev,
- zračni kondenzator je večji (tudi večje število ventilatorjev) in deluje stopenjsko.

Pri takšnih hladilnih sistemih je smiselna uporaba mikroprocesorskih krmilnikov, pri katerih lahko v vsakem

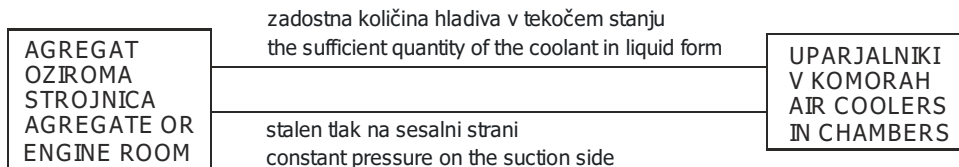
## 2.2 Complex refrigeration system control

The complex refrigeration system differs from the simple refrigeration system in the following ways:

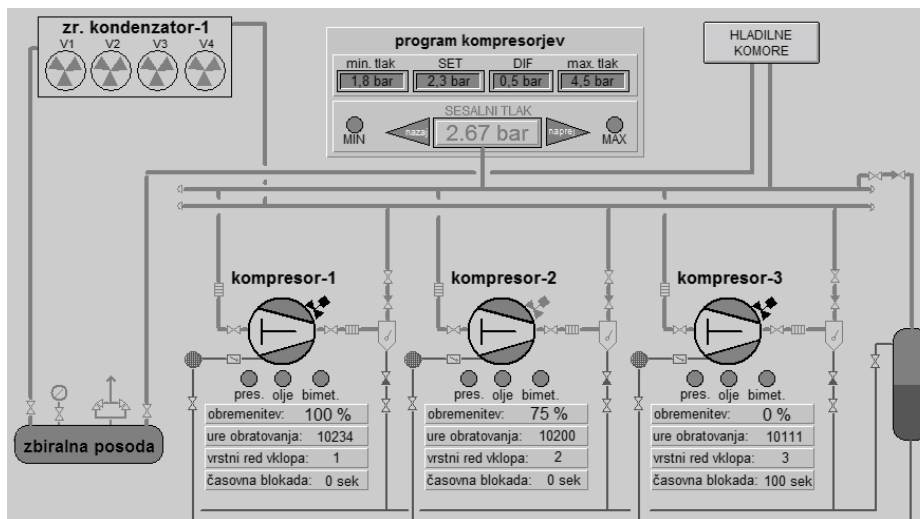
- it consists of more cooling chambers or evaporators
- it consists of more compressors
- the air condenser is bigger (and has more fans); it works in stages.

It is reasonable to use microprocessor control in this kind of refrigeration system, for we can take into consideration all states of the system





Sl. 4. Načelna shema zapletenega neposrednega hladilnega sistema  
 Fig. 4. The principle of the complex refrigeration system



Sl. 5. Vzporedna vezava treh kompresorjev

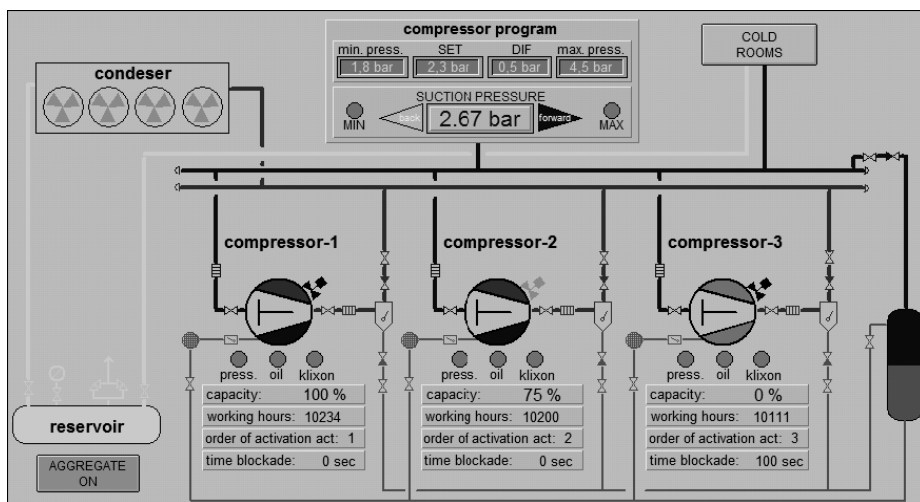


Fig. 5. Parallel binding of the three compressors

trenutku upoštevamo vsa stanja sistema in s tem na sistem vplivamo tako, da je učinek sistema največji [6].

Prvi del zapletenega hladilnega sistema je kompresorski agregat, pri večjih sistemih pa je lahko to vsa oprema, ki je v strojnici. Njegova naloga je, da vzdržuje stalen tlak na sesalni in tlačni strani sistema. Glavni element samega agregata hladilnega sistema

and so manipulate the system in a way that makes it most efficient [6].

The first part of the complex cooling system is a compression aggregate; in larger systems this may be the only equipment inside the engine room. The compressor aggregate preserves the pressure on a suction and a discharge side of the system. The main

je sklop kompresorjev ter zračni oziroma uparilni kondenzator z ventilatorji. Število kompresorjev kakor tudi število ventilatorjev kondenzatorja je odvisno od velikosti sistema.

Drugi del zapletenega hladilnega sistema so hladiva v posameznih hlajenih prostorih, ki skrbijo za vzdrževanje potrebnega temperaturnega režima.

### 2.3 Krmiljenje kompresorjev

Slika 5 prikazuje tri vzporedno vezane kompresorje, katerih naloga je vzdrževanje želene ga tlaka na sesalni strani hladilnega sistema.

Temelj za krmiljenje kompresorjev je tako imenovani računalniški program kompresorjev. V ta namen imamo na sesalnem vodu nameščeno tlačno tipalo, ki s signalom v vsakem trenutku daje informacijo o sesalnem tlaku. Sesalni tlak se v sistemu spreminja zaradi neenakomerne obremenitve s strani uporabnikov, to je dejanskega števila hladilnih komor, ki trenutno hladijo. Pogoj za vklop kompresorjev je torej povišanje sesalnega tlaka nad določeno vrednost. To vrednost imenujemo zelena vrednost (točka SET) sesalnega tlaka. Vrednost nastavljene točke SET je seveda odvisna od temperaturnega režima, za katerega je hladilni sistem narejen, oziroma od hladilnega medija.

Če sesalni tlak doseže vrednost točke SET in razliko DIF, torej SET + DIF, se prične tako imenovani program kompresorjev naprej oziroma analogno temu - pri točki SET in negativni razliki (SET - DIF) program nazaj. Opisano prikazuje tudi slika 6.

Glede na število in tehnološke zahteve hladilnih komor sta določena število in tip kompresorjev. V primeru, da imamo tri kompresorje s

elements of the aggregate are a set of compressors and an air or an evaporative condenser with fans. The number of the compressors and the number of the fans of the condenser depend on the size of the system.

The second part of the complex refrigeration system are coolers in separate rooms, which preserve the required temperature regime.

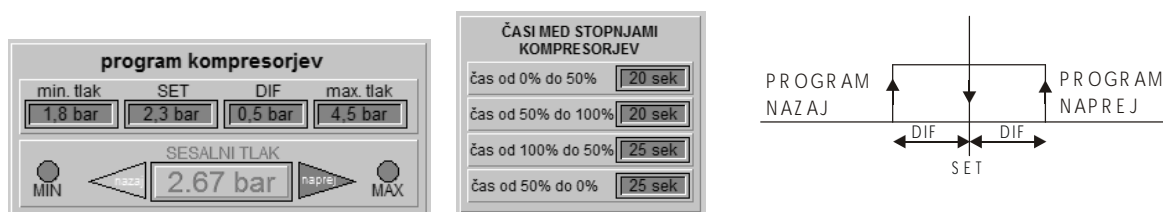
### 2.3 Compressor control

Figure 5 presents three parallel multiplex bound compressors. Their task is to preserve the desired pressure on the suction side of the refrigeration system.

The so-called compressor program is the basis of compressor control. For this reason, there is a pressure probe settled on the suction line. By means of a signal, the pressure probe constantly provides information on the suction pressure. The suction pressure changes due to consumers unequally loading the system. Actually, this is the number of cold stores in action. In order for compressors to be switched on, the suction pressure must rise above the set value (the SET point). The value set for the SET point depends on the temperature regime for which the cooling system is made for, or on the cooling medium.

When the suction pressure reaches the value set plus the difference (SET+DIF) the compressor program is activated, or similarly, with the set minus the difference (SET-DIF), the backward program comes into action. This is clear from Figure 6.

The number and the type of compressors are selected according to the number and the technological requirements of the cold stores.



Sl. 6. Program kompresorjev naprej - nazaj

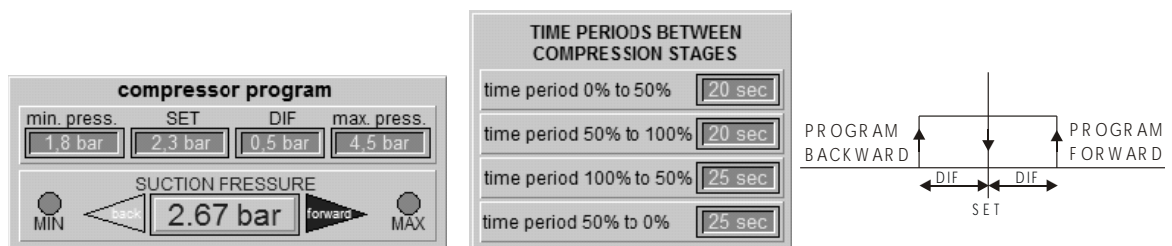


Fig. 6. Compressor program forward-backward

stopnjami 50 % ali 100 %, to pomeni, da bo celotna zmogljivost sistema kompresorjev razdeljena na 6 stopenj.

Z vklopom programa kompresorjev NAPREJ so izpolnjeni pogoji za vklop stopenj kompresorjev. Najprej se vklopi prva stopnja kompresorja, ki je prvi pripravljen za start, nato druga stopnja tega kompresorja in tako dalje do druge stopnje kompresorja, ki je kot zadnji določen za start.

Pri programu kompresorjev so zelo pomembni časi med stopnjami. V osnovi program deluje tako, da uporabnik nastavi zelene čase med stopnjami kompresorjev. Torej, ko pride do pogoja za program kompresorjev naprej, mora najprej preteči čas do vklopa prve stopnje, po vklopu le-te zopet čas do naslednje stopnje in tako dalje. Podobno je pri programu kompresorjev nazaj. Po pretečenem času se najprej izklopi druga stopnja kompresorja, ki se je vklopil zadnji, zatem po pretečenem času njegova prva stopnja in tako dalje do izklopa prve stopnje kompresorja, ki se je vklopil prvi. Večina samostojnih krmilnikov kompresorjev, ki se pojavljajo na tržišču, deluje po opisanem postopku. Naloga teh krmilnikov je torej vključevanje stopenj kompresorjev tako, da vzdržujejo sesalni tlak kar se da stalen in v bližini točke SET.

## 2.4 Smernice za povečanje hladilnega števila z izboljšanim krmiljenjem kompresorjev

Hladilno število, kot podatek o učinkovitosti hladilnega sistema, je določeno kot razmerje med odvedeno toploto  $Q_2$  in vloženim delom A ([1]). Enačba hladilnega števila ima obliko:

$$\varepsilon_H = Q_2/A$$

Pri zgoraj omenjenem krmiljenju večjega števila vzporedno vezanih kompresorjev se dogaja,

Providing there are three compressors of 50 or 100% capacity degrees, the entire capacity of the compressor system is divided into six stages.

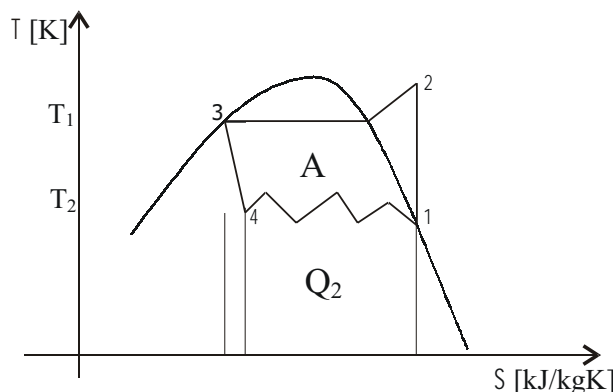
All the requirements for the activation of the stages of the compressors are fulfilled by switching on the forward compressor program. Firstly, the first stage of the compressor ready to start is activated, then the second stage of the compressor, and so on, up to the second stage of the compressor, which is the last intended to be activated.

The time periods between the stages are of chief importance in the compressor program. The program works in the following process. The consumer sets the desired time values between the stages of the compressors. That is, fulfilling the requirements for activation of the forward program, a time must pass before the activation of the first stage, after that, again, time must pass to the next stage and so on. The backward program works in a similar way. After a certain time has passed, the second stage of the lastly activated compressor is stopped, after that a time period must pass and then its first stage is stopped, and so on until the first stage of the firstly activated compressor is stopped. Most of the independent compressor controllers appearing on the market work on this principle. Their task is to switch on the compressor stages, in order to keep the suction pressure as constant as possible and close to the SET point.

## 2.4 Guidelines for increasing the coefficient of performance (COP) by improving the compressor control

COP, in the sense of information about the efficiency of the cooling system, is defined as a ratio of the heat removal  $Q_2$  to the work input A ([1]). The equation of COP is:

When controlling a large number of multiplex bound compressors it sometimes happens that the



Sl. 7. Parni hladilni postopek v diagramu T-S – nihanje tlaka uparjanja  
Fig. 7. Vapour cycle process in a T-S diagram - oscillating of vapour pressure

da sesalni tlak ni vedno enak, ampak se giblje v bližini točke SET. To pomeni, da na sliki 7 nimamo več premice med točkama 4 in 1, ampak neko nepravilno obliko, ki je odvisna od nihanja sesalnega tlaka. Sesalni tlak se spreminja po krivulji, katere oblika je odvisna od števila trenutno vklopljenih uparjalnikov v posameznih hlajenih prostorih ter od odvzema toplote iz le-teh. Hladilno število bi torej lahko povečali, če bi sesalni tlak vzdrževali čim višji in čimbolj stalen. Ker se naša obravnava nanaša predvsem na krmiljenje batnih kompresorjev, vezanih v vzporedni sistem, iščemo izboljšave na tem področju.

Pri izboljšavi krmiljenja kompresorjev se osredotočamo na vzdrževanje stalnega sesalnega tlaka s še večjo natančnostjo, kakor je opisano v prejšnjem poglavju.

Večjo natančnost vzdrževanja stalnega sesalnega tlaka lahko dosežemo s počasnejšim odzivom opisanega krmilja. Zamisel počasnejšega odziva je naslednja. Med spreminjanjem sesalnega tlaka procesor opazuje hitrost njegovega višanja oziroma nižanja. Če pri programu kompresorjev NAPREJ procesor zazna nižanje sesalnega tlaka, je to znak, da je v danem trenutku vklopljenih dovolj stopenj za trenutno obremenitev. Nepotrebno bi bilo vklopiti še eno stopnjo kompresorjev, če je zaznavalo sesalnega tlaka zaznalo upad višanja sesalnega tlaka. V tem primeru izvedemo upočasnitev programa NAPREJ tako, da postavimo časovne zakasnitve med stopnjami na vrednost nič ([5]). Zaradi tega se podaljša čas med stopnjami. Časi do vklopa stopenj, ki še niso vklopljene od takrat, ko se je naraščanje tlaka za trenutek ustavilo, se tako podaljšajo.

Podobno se dogaja pri programu kompresorjev NAZAJ. Pogoji za izklop stopenj je program kompresorjev NAZAJ in iztek časovnih zakasnitev posameznih stopenj. V primeru, da se med programom kompresorjev NAZAJ začne naraščati sesalni tlak, se časi med stopnjami postavijo na nič, kar pomeni, da se odziv krmilja upočasni.

Opisano lahko prikažemo tudi z uporabo časovnih diagramov, kar je razvidno s slike 8 [7].

Z navedenim krmiljenjem stopenj kompresorjev dosežemo, da se stopnje kompresorjev po nepotrebem ne vklopijo oziroma izklopijo. Na ta način se preveliko zviševanje oziroma zniževanje sesalnega tlaka umiri, kar pa pomeni manjše nihanje krivulje med točkama 4 in 1 v diagramu T-S s slike 7. Manjše nihanje omenjene krivulje vsekakor pomeni izboljšanje hladilnega števila.

## 2.5 Vzdrževanje temperature v komorah pri neposrednih hladilnih sistemih

Povprečno temperaturo v komori krmilje ves čas primerja z zeleno in po potrebi vklopi ventilatorje ter polnilni ventil uparjalnika. Želena

suction pressure is not always constant; although it is however, near the set point. According to Figure 7, this means that there is no straight line between points 4 and 1, there is an irregular shape instead, which depends on the suction pressure oscillation. The shape of the suction-pressure-change is a curve, which depends on the number of activated evaporators in the individual rooms and their heat removal. Preserving the suction pressure as high and as constant as possible, the COP can be increased. This research is an attempt to look for ways to improve the control of the reciprocating compressors that are bound in the multiplex system.

In order to improve the control of the compressor, we focus on preserving the suction pressure even more precisely than it was done in the previous section.

By decelerating the described transient response of the control system we can achieve a higher precision in preserving the suction pressure at a constant level. This is the idea of the slower response. The processor monitors the rising or falling speed of the suction pressure as it changes. Providing there are enough stages active for the present load of the system, the processor perceives a fall of the pressure in the forward program. Providing the suction pressure probe perceives a slowing rise of the suction pressure, it is unnecessary to activate another stage of the compressors. In this case we execute the deceleration of the forward program, so that we set the time delays between stages to zero ([5]). Consequently, the time periods between the stages are extended. The time periods to the activation of the stages that have been idle from the time the pressure increasing stopped for a while, are extended.

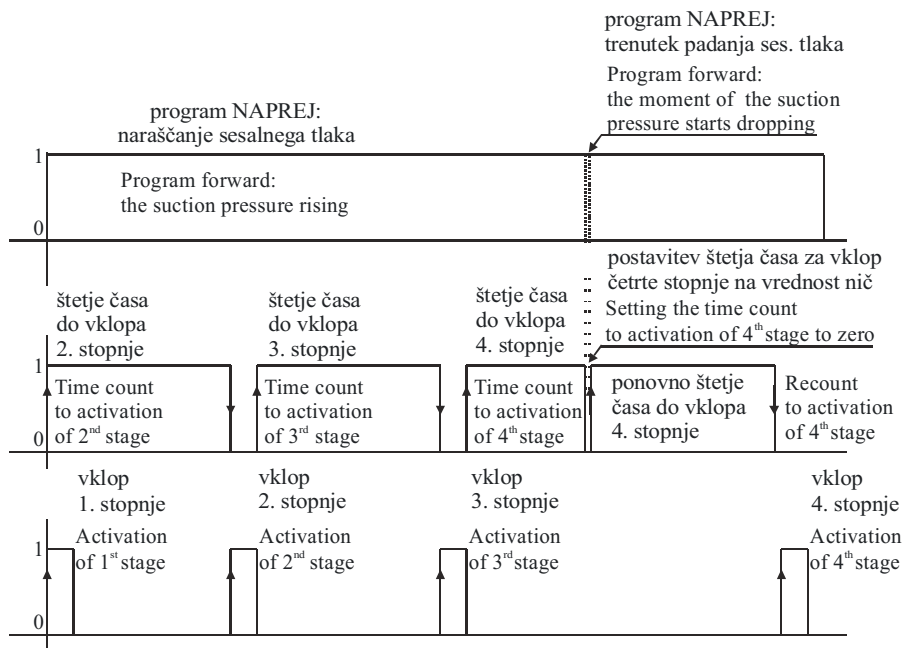
A similar process takes place in the backward program. The requirements for deactivating the stages are the compressor program backward and the delay of the stages being completed. In the event that the rising of the suction pressure takes place during the backward program, the time periods between the stages are set to zero, which means the reaction of the control system is decelerated.

This is presented in more detail in the time diagrams in Figure 8 [7].

With this kind of compressor stage control, we achieve stages that are not activated or deactivated unnecessarily. A too frequent increase or decrease of the suction pressure becomes less frequent and, consequently, the oscillation of the curve between points 4 and 1 in the T-S diagram (Figure 7) is reduced. Of course, a reduced oscillation of the curve means an improvement in the COP.

## 2.5 Temperature control in a direct refrigeration system

The controller constantly compares the average temperature to the required temperature and activates the fans and the expansion valve of the



Sl. 8. Upočasnitev vklopa stopenj kompresorjev v primeru nižanja sesalnega tlaka pri programu NAPREJ  
 Fig. 8. Deceleration of compressor stages in the event of the dropping of suction pressure in program forward

vrednost temperature smo v obravnavanem primeru označili z oznako SET, razliko med preklopi pa z oznako DIF. V primeru, da se povprečna temperatura poveča nad vrednost  $SET + DIF$ , se vključi hlajenje komore in ostane vklopljeno, dokler se povprečna temperatura ne zmanjša na ali pod vrednost SET. V primeru, da bi za vzdrževanje temperature v komori potrebovali tudi grelnike, bi se le-ti vklopili pri zmanjšanju povprečne temperature pod vrednost  $SET - DIF$ , vključeni pa bi ostali do vrednosti SET.

## 2.6 Odtaljevanje uparjalnika pri neposrednih hladilnih sistemih

Odtaljevanje je pri hladilnih komorah zelo pomemben postopek, ki v osnovi ne pripomore k hlajenju komore, ampak celo povečuje toplotne dobitke, saj pri postopku odtaljevanja z grelniki vnašamo toploto v notranjost komore in tudi ustavljamo postopek hlajenja. Ne glede na to je odtaljevanje postopek, ki je nujno potreben. Na lamelah uparjalnika v komori se pri postopku hlajenja nabira srež. Če pravočasno ne poskrbimo za njegovo odstranitev, se sreža nabere toliko, da je pretok zraka med lamelami zelo oviran, lahko pa tudi onemogočen. V takšnem primeru uparjalnik ne more več opravljati naloge hlajenja. Za odtaljevanje hladiv v hladilnih komorah uporabljamo odtaljevanja z grelniki, zrakom, vodo ali vročim plinom. Ne glede na način odtaljevanja veljajo pri krmiljenju odtaljevanja splošna načela, ki so opisana v nadaljevanju.

evaporator, if necessary. In the case that we are dealing with, the required temperature is defined by SET and the difference between shifts by DIF. Providing the average temperature rises above  $SET + DIF$ , the cooling of the chamber is activated and is in operation until the average temperature drops to, or under, the SET value. Providing we require heaters for heating in order to preserve the temperature in the chamber, they are activated after the average temperature drops below the  $SET - DIF$  value, and continue to operate until the temperature reaches the SET value.

## 2.6 Defrosting process in a direct refrigeration system

The defrosting process is a very important process in the refrigeration of cold stores. Basically, it does not contribute to the refrigeration of the chamber, it even increases the heat loss, because in the process of defrosting with heaters, we bring the heat into the chamber and interrupt the refrigeration. Despite this fact, the defrosting process is inevitable. Ice and hoar frost appear on the surface of the fins of the cooler during this process. Unless we remove them, they become so large that they obstructs the air flow through the fins. In this case the cooler can no longer perform its function. To remove the hoar frost from the coolers, we do the defrosting using heaters, air, water, or hot gas. No matter what method we choose, there are certain principles to be followed during defrosting control.



Prvi korak pri odtaljevanju je tako imenovani ČAS MED ODTALJEVANJI. To ni dejanski čas, temveč čas dejanskega hlajenja, ki mora preteči od prenehanja nekega odtaljevanja do naslednje sprožitve odtaljevanja. Uporabnik ta čas nastavlja med vrednostjo treh do osem ur. Izbira je odvisna predvsem od namembnosti komore. V primeru, da uporabnik pogosto odpira vrata komore in vnaša blago z večjo relativno vlago, temperatura uparjanja ali hladilne mešanice na hladivu pa je dovolj nizka, je potreba po odtaljevanju pogostejša.

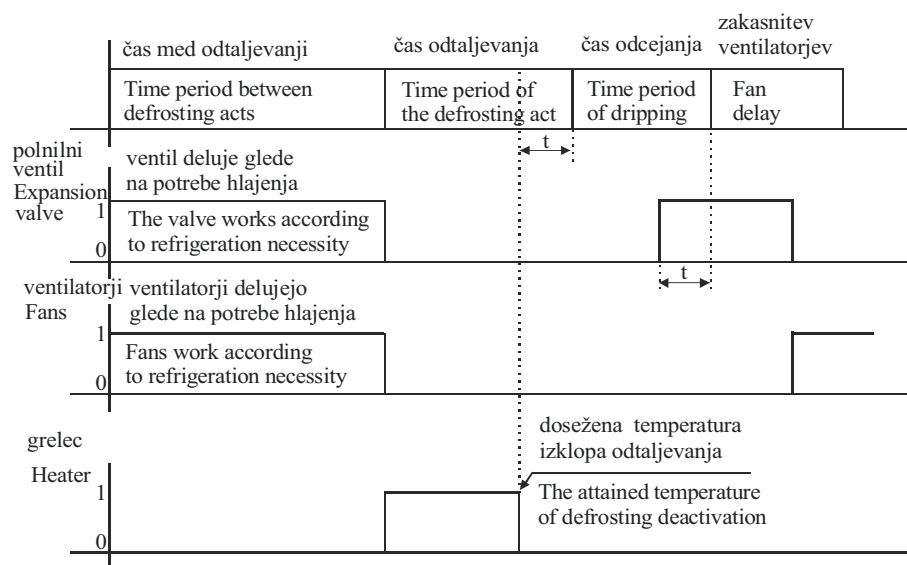
Naslednji korak, ki prične teči, ko pride do postopka odtaljevanja (preteku časa med odtaljevanji), je ČAS ODTALJEVANJA. V tem času poteka odtaljevanje uparjalnika. Ventilatorji mirujejo, delujejo pa grelniki ali ventil vročega plina. Ta korak se konča, ko temperatura v uparjalniku doseže dovolj visoko vrednost (med 4 °C in 10 °C). Ta vrednost je določena s parametrom TEMPERATURA IZKLOPA ODTALJEVANJA.

Če v nastavljenem času odtaljevanja temperatura na hladilniku ne bi dosegla omenjene vrednosti, bi se korak končal po preteku časa odtaljevanja. Koraku odtaljevanja sledi korak ODCEJANJA. V tem koraku mirujejo vsi električni elementi. V tem času se kapljice vode iz lamel uparjalnika odcedijo v kad oziroma odtok. Naslednji korak je ZAKASNITEV VENTILATORJEV. Če bi takoj po odcejanju vklopili ventilatorje uparjalnika, bi to povzročilo razpršenje preostalih kapljic, ki se jim ni uspelo odcediti iz lamel, v prostor. Za preprečitev tega je treba najprej vklopiti hlajenje (polnilni ventil), šele po nastavljenem času pa se vklopijo ventilatorji. Tako preostale kapljice zamrznejo na lamelah in jih ventilatorji ne morejo razpršiti v prostor.

The first step is the so-called TIME PERIOD BETWEEN DEFROSTING ACTS. This is not the actual time but a time of effective cooling, which is supposed to pass until the end of a certain defrosting act and to the next activation of defrosting. The user may set the time value at three to eight hours. The choice depends on what the chamber is used for. The defrosting is required more frequently when the user frequently opens the doors and brings in goods with a higher relative moisture, and the temperature of the evaporation or the cooling mixture on the cooler is low enough.

The next step is activated after the time period of the defrosting has passed. This step is called TIME PERIOD OF THE DEFROSTING ACT. At this point the defrosting of the cooler takes place. The fans are idle but the heaters or the hot-gas valve is activated. The step ends when the temperature in the cooler reaches a high enough value (between 4 and 10°C). This value is defined by a parameter THE TEMPERATURE ENDING THE DEFROSTING ACT.

If the temperature of the cooler does not reach the value mentioned in the set period of time, this step is finished after the defrosting time has passed. The DRIPPING step follows. Now all the elements are idle. In this time, the water drops drip from the fins of the cooler into the tray or the outlet. The step that follows is THE FAN DELAY. Activating the fans of the cooler immediately after the dripping would cause spraying about the remaining drops of water, which have not managed to drip out of the fins. To prevent that from happening it is necessary to activate the cooling (expansion valve) first, and only after the set time the fans can be activated. Now the drops freeze on the surface of the fins and cannot be sprayed about by the fans.



Sl. 9. Odtaljevanje hladilnika z upoštevanjem celotnega časa postopka odtaljevanja  
Fig. 9. Defrosting the cooler in terms of the total time of the defrosting process

S končanjem koraka ZAKASNITEV VENTILATORJEV se vrnemo na prvi korak, imenovan ČAS MED ODTALJEVANJI. Tako se postopki ponavljajo. Na sliki 9 so prikazani koraki odtaljevanja v časovnem diagramu.

## 2.7 Vzdrževanje temperature v komorah pri posrednih hladilnih sistemih

Tako kakor pri neposrednih hladilnih sistemih tudi pri posrednih merimo temperaturo ali povprečne temperatur v komori. Glede na izmerjeno in dejansko temperaturo v komori se vključujejo in izključujejo ventilatorji hladilnika. Podobno vlogo kakršno ima pri neposrednih sistemih polnilni ventil, ima pri posrednih sistemih črpalka in tripotni ventil hladilne mešanice na vstopu v hladilnik.

Bistvena prednost posrednega hladilnega sistema pred neposrednim je ta, da lahko z uporabo zveznega pogona motornega ventila in proporcionalno integracijsko diferencialnega (PID) krmilnika, dosegamo poljubno vrednost temperature na lamelah hladilnika in s tem temperaturo izpihanega zraka. Tako lahko pri določenih vrstah živil (npr. skladiščenje jabolk) dosežemo manjši odvzem vlage.

Temperaturno zaznavalo meri temperaturo hladilne mešanice na izstopu iz tripotnega ventila. Ta je pri normalnem delovanju oziroma v primeru hlajenja in delovanja črpalke praktično tudi temperatura lamel hladilnika. S primerjavo želene temperature hladilne mešanice v hladilniku z dejansko izmerjeno vpliva PID krmilnik na lego tripotnega ventila. Črpalka deluje ves čas hlajenja, prav tako tudi ventilatorji hladilnika.

Po dosegu želene temperature prostora se izklopijo ventilatorji hladilnika ter črpalka hladilne mešanice. Lego ventila je v času, ko ni potrebe po hlajenju, bolje obdržati v takšni legi, v kakršni je bil v

As THE FAN DELAY is completed, we return to step one, the TIME PERIOD BETWEEN THE DEFROSTING ACTS. The steps are being repeated constantly. Figure 9 shows these steps in a time diagram.

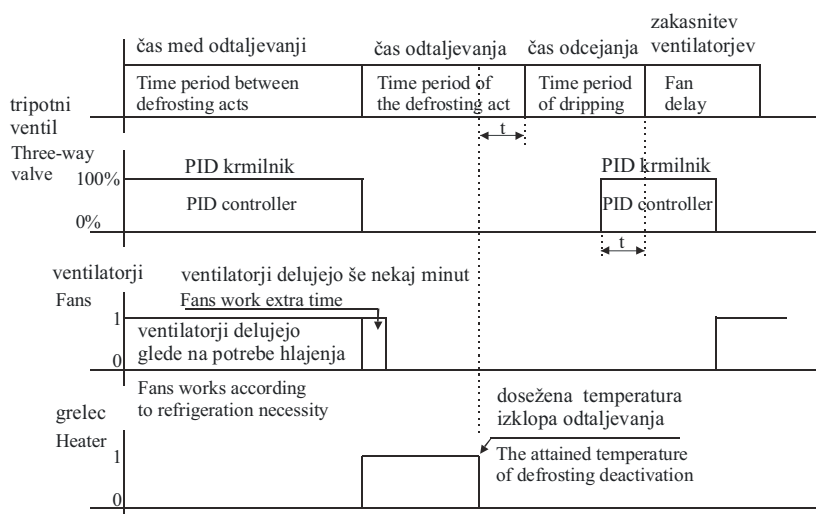
## 2.7 Temperature control in an indirect refrigeration system

The temperature or the average temperature inside the chamber is measured in direct systems as well as in indirect refrigeration systems. The fans in the chamber are activated and deactivated according to the measured and the actual temperatures. In the indirect system, the pump and the three-way valve of the cooling mixture at the entrance of the cooler have a similar function to that of the expansion valve in the direct system.

The advantage of the indirect system is that we can achieve any temperature value in the coil of the cooler, and therefore the temperature of the blown out air, by using a valve with a proportional actuator and PID controller. Consequently, we can achieve a lesser removal of the moisture from a certain type of food (i.e., apple storage).

The temperature probe measures the temperature of the cooling mixture on the exit of the three-way valve. The temperature, in the normal state or in cooling and pump activation, is the same as the temperature of the coil of the cooler. The PID controller influences the position of the three-way valve by comparing the required temperature of the cooling mixture in the cooler to the measured temperature. The pump and the fans of the cooler are active during the whole time period of the cooling process.

As the required temperature is attained, the fans of the cooler and the pump of the cooling mixture are shut off. During these times the refrigeration is unnecessary, it is better to preserve the position of the



Sl. 10. Odtaljevanje hladilnika pri posrednem sistemu  
Fig. 10. Defrosting the cooler in an indirect system

trenutku prenehanja hlajenja. Tako bo ob ponovni potrebi po hlajenju ventil hitreje dosegel lego, ki je potrebna za doseganje želene temperature hladilne mešanice.

## 2.8 Odtaljevanje hladilnikov pri posrednih hladilnih sistemih

Kakor je bilo že poprej navedeno, je sredstvo, ki se pri posrednih hladilnih sistemih pretaka skozi hladivo zraka, ledna voda ali glikol. Količina vode oziroma glikola, ki je v nekem trenutku v hladilniku zraka, ima večjo toplotno zmogljivost pri segrevanju oziroma shlajevanju kakor na primer freon, ki se pri neposrednih sistemih uparja v hladivu. Zaradi navedenega učinka je treba pri odtaljevanju hladiva upoštevati določene posebnosti, ki se razlikujejo od odtaljevanja uparjalnikov pri neposrednih sistemih.

Pred začetkom odtaljevanja hladilnika je treba najprej popolnoma zapreti tripotni ventil hladilne mešanice. Črpalka naj deluje nepretrgano naprej. Ventilatorji hladiva naj še nekaj minut delujejo, da tako še nekoliko ohladijo prostor, kajti akumulacija hladu je v hladilniku nezanemarljiva. Čas, ki ga navajamo kot nekaj minut, je odvisen predvsem od velikosti hladiva, običajno pa je ta vrednost štiri minute.

Po preteku tega časa naj se ventilatorji izklopijo, vklopi pa naj se grelnik za odtaljevanje. Od tu dalje je postopek povsem podoben odtaljevanju pri neposrednih sistemih, le da nalogo termostata, ki izklopi grelnike, nadomešča kar temperaturno zaznavalo hladilne mešanice, ki je v fazi hlajenja rabilo kot krmiljena veličina.

### 3 SKLEP

Ne glede na to, ali imamo neposreden ali posreden hladilni sistem, je izbira med klasičnim in prostoprogramljivim mikropostopkorskim krmiljenjem odvisna od zapletenosti hladilnega sistema ter od tehnoloških zahtev hladilne komore. Če imamo velike zahteve glede nadzora nad krmiljenjem hladilnih naprav v hladilni komori, je uporaba prostoprogramljivih krmilnih sistemov neizogibna. Enako velja tudi v primeru zapletenega sistema na ravni kompresorskega agregata.

V prispevku želimo poudariti, da je v primeru prostoprogramljivih krmiljenj vredno izdelati krmilje, ki izboljšuje učinkovitost hladilnega sistema ter večje udobje pri nadzoru elementov hladilne komore. Analogno obravnavani nalogi bi podobno lahko obravnavali tudi preostala področja hladilništva.

### 4 LITERATURA 4 REFERENCES

- [1] ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers): *Handbook - Fundamentals*, Atlanta, 1997, Chapter 1: Thermodynamics and refrigeration cycles, 12-19
- [2] Vujić, S. (1983) Rashladni uređaji. Mašinski fakultet, Beograd, 109-118
- [3] Kladnik, R. (1989) Visokošolska fizika 1. del, DZS, Ljubljana, 210-215

valve from the moment the cooling was stopped. Thus, in the case of restarting the refrigeration, the valve will be able to immediately reach the required position needed to attain the required temperature of the cooling mixture.

## 2.8 Defrosting process in an indirect refrigeration system

As already stated, the medium that flows through the air cooler is water or glycol. The amount of water or glycol that is in the air cooler at a certain moment has a higher persistency when being heated or refrigerated than, for example, freon, which transforms itself into a vapor in the cooler. Because of this effect, it is important to consider certain particularities, which differ from those in the direct system defrosting.

It is crucial to shut off the three-way valve completely before starting the defrosting of the cooler. The cold in the cooler is not to be ignored, therefore, the fans should continue to work in order to cool the air even more. The time depends on the size of the cooler, but it usually takes four minutes.

As the above time period passes, the fans should be shut off and the heater should be activated for defrosting. From this point onwards, the procedure resembles the defrosting in direct systems, with one difference. The thermostat that shuts off the heaters is replaced by the temperature probe of the cooling mixture.

### 3 CONCLUSION

A direct or an indirect refrigeration system, the choice between classical and microprocessor control, depends on the complexity of the cooling system and the technological requirements of the cold store. Assuming we have high-quality requirements for controlling the cooling machines in the cold store, choosing microprocessor control is inevitable. The same goes for the complex system at a level of the compression aggregate.

In this paper we have tried to emphasize that it pays to choose a form of control that results in an improvement in the refrigeration system and offers more comfort in supervising the elements in the cold store.

- [4] ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and air-conditioning engineers): *Handbook - Refrigeration, Atlanta*, 1998, Chapter 4: Secondary coolants in refrigeration systems, 1-6
- [5] OMRON: SYSMAC Program C200H operation manual, 1992, 159-163
- [6] Avtomatika Metronik: Revija o avtomatizaciji procesov, Ljubljana, oktober 1999, Trendi v razvoju SCADA sistemov, 7-9
- [7] Cajhen, R. (1990) Pomnilniško programljivi krmilni sistemi, Univerza v Ljubljani, 54-55
- [8] <http://www.ikk-online.com/main/d9v18zx1/d9v1ly3l/d9v6pe27/page.html>

Naslov avtorjev: Janez Primožič  
prof.dr. Rajko Svečko  
Univerza v Mariboru  
Smetanova 17  
2000 Maribor  
rajko.svecko@uni-mb.si

Authors' Address: Janez Primožič  
Prof.Dr. Rajko Svečko  
University of Maribor  
Smetanova 17  
2000 Maribor, Slovenia  
rajko.svecko@uni-mb.si

Prejeto: 16.10.2003  
Received:

Sprejeto: 8.4.2004  
Accepted:

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

## Meritev izkoristka in nastavitve krmilnih parametrov kaplanove turbine z dolgim cevničnim sistemom s primerjalno metodo

### Measurement of Relative Turbine Efficiency and Adjustment of Governing Parameters on Long Penstock Kaplan Turbine with Comparative Method

Andrej J. Trebše

*Prispevek obravnava meritve izkoristka kaplanove turbine s primerjalno metodo (test indeks) ter nastavitve delovanja krmilnih sistemov za upravljanje vodilnika in gonilnika. Pri dolgem pretočnem traktu se zaradi večjih izgub vodnega padca med obremenjevanjem stroja spreminja čisti padec.*

*Na podlagi modelnih preizkusov kaplanove turbine in meritve izkoristka turbine na prototipu, smo s primerjalno metodo optimirali krmiljenje vodnega stroja.*

© 2004 Strojniški vestnik. Vse pravice pridržane.

**(Ključne besede: turbine kaplan, metode primerjalne, izkoristek strojev, krmiljenje)**

*The paper deals with efficiency measurement of Kaplan turbine with relative method (index test) and adjustment of operating of runner and guide vane governing system. At certain longer penstocks the losses in conduit at turbine load operation change the net head.*

*On basis of model test on Kaplan turbine and relative turbine efficiency measurement on prototype the turbine governing system was optimized in accordance with comparative method.*

© 2004 Journal of Mechanical Engineering. All rights reserved.

**(Keywords: Kaplan turbine, comparative methods, turbine efficiency, turbine governing system)**

#### 0 UVOD

Na hidroelektrarnah Doblar II in Plave II smo opravili preverjanje izkoristka agregata po primerjalni metodi - testni indeks v skladu s priporočili SIST EN 60041 [1] - poglavje 15. Rezultate meritev smo uporabili tudi za določitev krmilnih parametrov in omejitev delovanja vodnega stroja.

Meritve so bile opravljene pri povprečnih čistih padcih  $H_n$  in preračunane na zajamčeni padec za povečanje turbinske moči. Zato smo te meritve uporabili tudi za dokazovanje izpolnjevanja povečanih zajamčenih vrednosti.

Pri obremenjevanju stroja se zaradi dolgega cevne sistema povečajo energijske izgube, tako da ni mogoče krmiliti odprtja turbine na povprečnem čistem padcu. V krmilni sistem smo morali vgraditi nov model upravljanja odprtja kaplanove turbine po trenutnem čistem padcu vode.

Običajno terenske razmere ne dopuščajo meritev po primerjalni metodi na celotnem področju školjčnega diagrama. Včasih se lahko opravi meritev le na enem padcu, kar pa ni dovolj za izdelavo delovalnega diagrama turbine.

V primeru, da so bili opravljeni modelni preizkusi, se lahko po spodaj prikazani metodi opravi primerjava med modelom in prototipom.

Nastavitev obratovalnega razmerja med vodilnikom in gonilnikom po trenutnem čistem padcu je bolj natančna kakor v primeru, če bi stroj deloval na povprečnem čistem padcu.

#### 1 PRERAČUN FIZIKALNIH VELIČIN

Zbiranje podatkov in preračun merilniških rezultatov smo opravili z računalnikom, ki omogoča skupaj z uporabljenimi merilniškimi enotami natančno obdelavo podatkov. V skladu s priporočili SIST EN 60041 [1], SIST IEC 60308 [2] in SIST IEC 60545 [3] smo merili vse fizikalne veličine, tako da smo uporabili umerjene instrumente z visokim natančnostnim razredom.

Poglavitna naloga meritev je, da bi čim bolj natančno izmerili in določili pravo vrednost merjene fizikalne veličine. Pri vsakem merjenju nastanejo odstopki ali napake meritve. Pri oceni meritvenega odstopka smo upoštevali naslednje možne vrste napak:



- **Sistematični odstopki** – s kalibriranjem določen kakovostni razred merilnih instrumentov.
- **Naključni odstopki** – razsipanje rezultatov smo obdelali po metodi najmanjših kvadratov (GAUSS).
- **Sestavljeni odstopki** – napaka rezultata se v tem primeru dobi s pomočjo totalnega diferenciala funkcije.
- **Skupni meritveni odstopki** – oceno pogreška meritev smo določili tako, da smo v enačbo za preračun skupnega odstopka vpisali verjetne odstopke fizikalnih veličin, ki se pojavijo v enačbi za preračun turbinskega izkoristka, turbinske moči in pretoka v skladu s priporočili SIST EN 60041 [1].

V nadaljevanju podajamo postopke za preračun turbinskih parametrov.

### 1.1 Zemeljski pospešek

Zemeljski pospešek smo preračunali v skladu s priporočilom SIST EN 60041 [1], kjer je v Helmertovi formuli upoštevana odvisnost geografske širine  $\varphi$  (°) in nadmorske višine  $z$  (m)

$$g = 9,7803 \cdot (1 + 0,0053 \cdot \sin^2 \varphi) - 3 \cdot 10^{-6} \cdot z \quad (1).$$

Hidroelektrarna leži na geografski širini ( $\varphi = 46,046^\circ$ ) in nadmorski višini ( $z = 95,42\text{m}$ ).

Z upoštevanjem geografskih veličin smo z enačbo (1) določili zemeljski pospešek, ki smo ga uporabljali pri računanju drugih fizikalnih vrednosti:  $g = 9,80695 \text{ (ms}^{-2}\text{)}$

### 1.2 Gostota vode v odvisnosti od temperature in tlaka

V priporočilih SIST EN 60041 [1] je podana enačba, v kateri je prikazana odvisnost gostote vode od temperature vode in tlaka vode:

$$\rho_v = 999,972 \cdot \left[ 1 - \frac{(T - 4,6864)^2}{510113,5} \cdot \frac{T + 289,7991}{T + 58,11615} \right] \frac{1}{1 - k \cdot p} \quad (2).$$

V to enačbo smo vpisali naslednje spremenljivke:

- $T$  temperatura vode v °C,
- $p$  vodni tlak, merjen pred turbino v barih,
- $k$  konstanta vodne stisljivosti  $k = 47,1 \cdot 10^{-6} \text{ bar}^{-1}$ .

Pri vsakem preračunu smo upoštevali vodni tlak v barih pri vtoku vode v spiralni okrov. Temperaturo vode smo izmerili pred preizkušanjem.

### 1.3 Preračun energijskih veličin

Na podlagi spodaj prikazanega energijskega prereza agregata, smo najprej izpostavili preračun energijskih veličin (sl. 1).

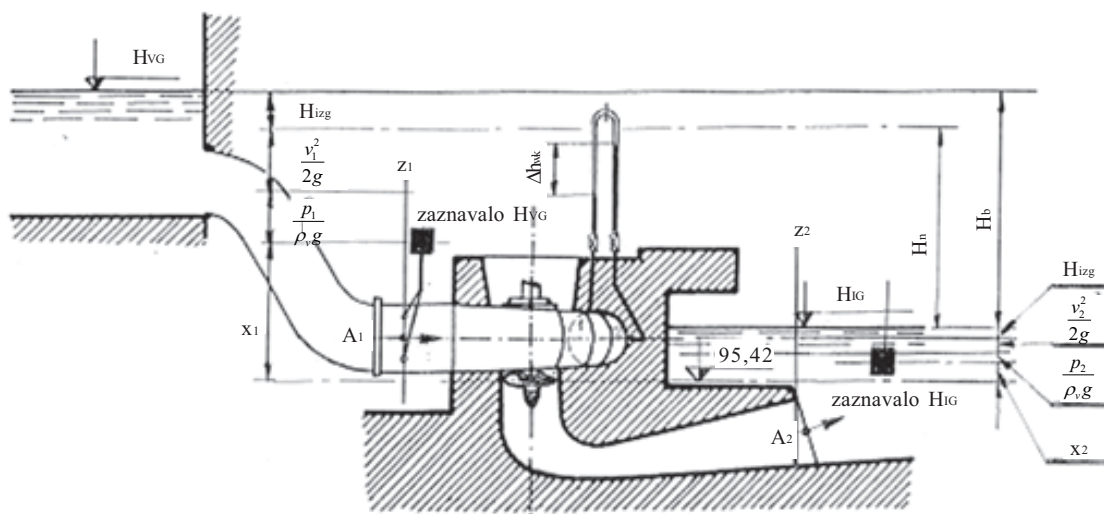
#### 1.3.1 Preračun specifične energije - čisti padec

Za določitev višinskih in nivojskih merilnih instrumentov na iztoku vode iz turbine, smo uporabili znane višinske točke in meritve spodnje vode, ki jo uporablja elektrarna. Ta meritev je povezana tudi v turbinskem krmilju, kjer se te meritve uporabijo za preračun trenutnega vodnega padca.

Vodni tlak, merjen pred turbino, smo uporabili za preračun statičnega dela vodnega tlaka pri vtoku vode v turbino.

Padec na turbini smo preračunali v skladu s priporočili SIST EN 60041 [1] glede na izmerjeni vodni tlak in podane geodetske višinske razlike.

Torej smo čisti padec v spodnji enačbi izrazili tako, da je le-ta enak razliki energijskih veličin pred turbino v točki  $z_1$  in na iztoku iz turbine v točki  $z_2$ . [8]:



Sl. 1. Prikaz energijskega prereza turbine

$$H_n = z_1 + \frac{p_1}{\rho_v \cdot g} + \frac{v_1^2}{2 \cdot g} - z_2 - \frac{p_2}{\rho_v \cdot g} - \frac{v_2^2}{2 \cdot g} \quad (3).$$

Glede na to, da smo za celotni preračun čistega padca izbrali referenčno ničelno točko sredino gonilnika, ki je na višinski koti 95,42 m.n.v., smo po spodnjih enačbah (4) do (9) razčlenili statični in dinamični čisti padec.

### 1.3.1.1 Preračun statičnega dela čistega padca

Statični vodni tlak, merjen pri vtoku v turbino  $H_{sv}$ :

$$\frac{p_1}{\rho_v \cdot g} = H_{sv} = (10^5 \cdot H_{stv}) / \rho_v \cdot g + x_1 \quad (4),$$

kjer so:

- $p_1$  vodni tlak pri vtoku v turbino,
  - $H_{stv}$  statična tlačna višina pri vtoku,
  - $x_1$  razdalja med sredino zaznavala in koto gonilnika m.
- Statični vodni tlak, merjen na iztoku iz turbine  $H_{si}$ :

$$\frac{p_2}{\rho_v \cdot g} = H_{si} = (10^5 \cdot H_{sti}) / \rho_v \cdot g + x_2 \quad (5),$$

kjer so:

- $p_2$  vodni tlak pri iztoku iz turbine,
- $H_{sti}$  statična tlačna višina pri iztoku,
- $x_2$  razdalja med sredino zaznavala in koto gonilnika m.

Celotni statični del vodnega padca  $H_{st}$  smo izrazili v spodnji enačbi:

$$H_{st} = H_{sv} - H_{si} \quad (6).$$

### 1.3.1.2 Preračun dinamičnega dela neto padca

Dinamični del čistega padca smo preračunali z upoštevanjem vtočne in iztočne povprečne hitrosti vode:

$$H_{din} = \frac{v_1^2}{2 \cdot g} - \frac{v_2^2}{2 \cdot g} \quad (7).$$

Vodne hitrosti ne moremo meriti neposredno, zato smo izrazili hitrost vode z vstopnim in izstopnim prerezom  $A_1$  in  $A_2$  ter preračunanim celotnim pretokom  $Q_0$

Izmerili smo vstopni prerez  $A_1$  in izstopni prerez  $A_2$  ter upoštevali preračunani zemeljski pospešek  $g = 9,80695$  tako, da smo izrazili dinamični padec v enačbi (8) samo s pretokom:

$$H_{din} = \frac{Q_0^2}{2 \cdot g} \cdot \left( \frac{1}{A_1^2} - \frac{1}{A_2^2} \right) \quad (8).$$

### 1.3.1.3 Preračun celotnega čistega padca

Čisti padec  $H_n$  smo nato preračunali po enačbi:

$$H_n = H_{st} + H_{din} \quad (9).$$

### 1.3.2 Preračun pretoka

Winter-Kennedyjeva metoda preračuna pretoka vode skozi turbino sloni na meritvi razlike vodnega tlaka v spiralnem okrovu  $\Delta h_{WK}$  in konstanti  $k_0$ .

V skladu s priporočilom SIST EN 60041 [1] smo po spodnji enačbi (10) preračunavali pretok vode skozi turbino. Natančnost meritve pretoka smo preračunali z upoštevanjem ocene pogreška meritev, opisane v poglavju 1 in v skladu s priporočilom SIST EN 60041 [1].

Konstanto za izračun pretoka, ki je odvisna od geometrijske oblike spiralnega okrova, smo izračunali po enačbi (11) [4] in [5]:

$$Q_0 = k_0 \cdot (\Delta h_{WK})^n \quad (10),$$

kjer so:

- $n = 0,48 - 0,52$  eksponent tlačne diference,
- $\Delta h_{WK}$  vodni tlak, merjen na dveh različnih radijih (1 in 2) v spiralnem okrovu v barih in preračunan v metre vodnega stolpca,
- $k_0$  konstanta, ki je odvisna od geometrijske oblike spiralnega okrova in kota merilnih priključkov in se preračuna po spodnji enačbi:

$$k_0 = \frac{2\pi}{\varphi} \cdot \sqrt{2g} \cdot \frac{r_1 \cdot r_2}{\sqrt{r_2^2 - r_1^2}} \cdot \int_{r_1}^{r_2} \frac{a}{r} \cdot dr \quad (11),$$

kjer so:

- $\varphi$  kot, ki označuje izbrani prerez, na katerem smo določili pretok,
- $r_1$  polmer meritve diferencialnega tlaka  $\Delta h_{WK} 1$ ,
- $r_2$  polmer meritve diferencialnega tlaka  $\Delta h_{WK} 2$ ,
- $r_z$  zunanji polmer spiralnega okrova,
- $r_n$  notranji polmer spiralnega okrova,
- $a$  širina spiralnega okrova,
- $r$  polmer,
- $dr$  prirastek polmera.

### 1.3.3 Preračun turbinskega izkoristka

Pri preračunu turbinskega izkoristka smo upoštevali zajamčeni izkoristek generatorja, ki ga je podal proizvajalec električnega stroja.

V skladu s priporočilom SIST EN 60041 [1] smo merili generatorsko moč  $P_{gen}$  na sponkah merilnih tokovnih in napetostnih transformatorjev, ki so vgrajeni v generatorskem merilnem sistemu.

Meritev generatorske moči smo opravili po trivatmetrski metodi. Natančnost meritve generatorske moči smo preračunali z upoštevanjem ocene pogreška meritev, opisane v poglavju 1 in v skladu s priporočilom SIST EN 60041 [1].

### 1.3.3.1 Preračun generatorskega izkoristka

Na podlagi zajamčenih vrednosti izkoristka generatorja smo določili odvisnost generatorskega

izkoristka od obremenitve stroja – enačba (12). Z upoštevanjem spodnjih podatkov smo preračunali generatorski izkoristek, ki ga je proizvajalec generatorja zajamčil pri faktorju generatorske moči  $\cos \phi = 1$ :

$$\eta_{gen} = 1,45 \cdot 10^{-6} \cdot P_{gen}^3 - 1,4086 \cdot 10^{-4} \cdot P_{gen}^2 + 4,71556 \cdot 10^{-3} \cdot P_{gen} + 0,92214376 \quad (12).$$

### 1.3.3.2 Preračun turbinske moči

Na podlagi preračunanega generatorskega izkoristka in na podlagi izmerjene generatorske moči  $P_{gen}$  smo preračunali turbinsko moč  $P_{tur}$ :

$$P_{tur} = \frac{P_{gen}}{\eta_{gen}} \quad (13).$$

### 1.3.3.3 Preračun turbinskega izkoristka

Turbinski izkoristek smo preračunali na podlagi izmerjenih in preračunanih fizikalnih veličin: čistega padca, pretoka in turbinske moči. V skladu s spodnjo enačbo smo prilagodili tudi vse preostale preračune:

$$\eta_{tur} = \frac{P_{tur}}{\rho_v \cdot g \cdot Q_0 \cdot H_n} \quad (14).$$

## 1.4 Preračun rezultatov na povprečni ali zajamčeni čisti padec

V skladu s priporočili SIST EN 60041 [1] smo vse merilniške rezultate pretoka  $Q_0$  in turbinske moči  $P_{tur}$  pri trenutnih čistih padcih  $H_n$  preračunali na

zajamčeni čisti padec  $H_{gar}$  po spodnjih enačbah (15) in (16):

$$P_{gar} = P_{tur} \cdot \left( \frac{H_{gar}}{H_n} \right)^{1,5} \quad (15)$$

$$Q_{gar} = Q_0 \cdot \left( \frac{H_{gar}}{H_n} \right)^{0,5} \quad (16),$$

kjer so:

- $P_{tur}$  preračunana turbinska moč,
- $P_{gar}$  zajamčena turbinska moč,
- $Q_0$  preračunani pretok,
- $Q_{gar}$  zajamčeni pretok.
- $H_n$  izmerjeni neto padec,
- $H_{gar}$  zajamčeni padec.

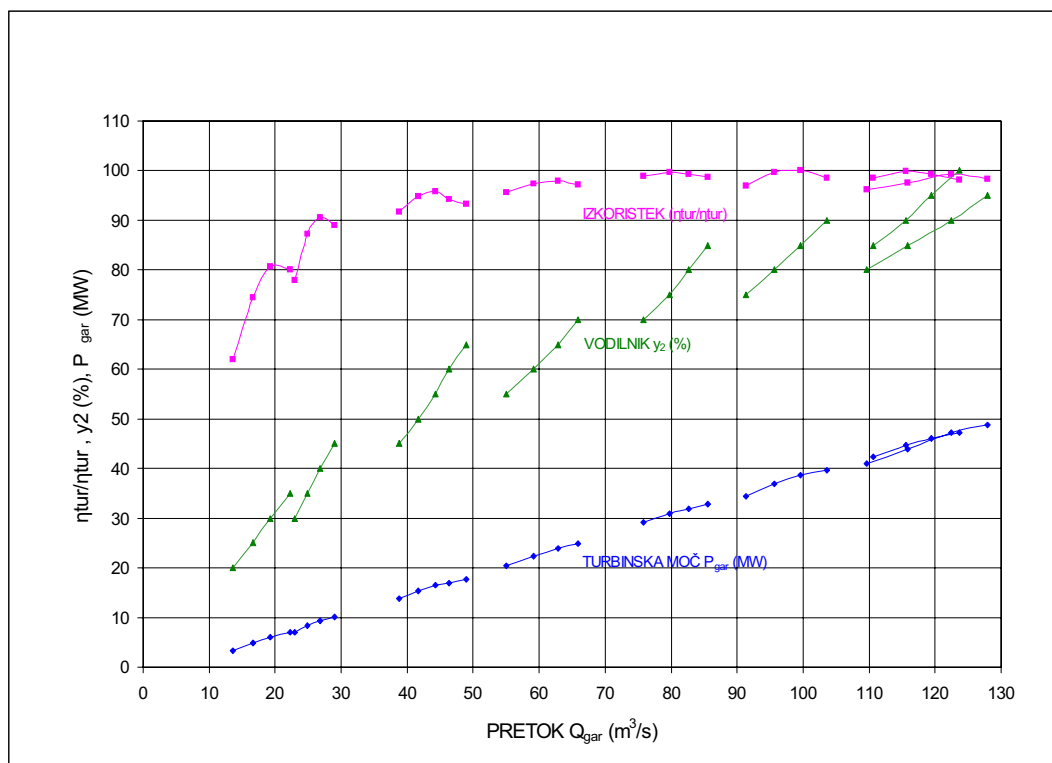
## 2 PREDSTAVITEV MERILNIŠKIH REZULTATOV

### 2.1 Preračun tlačnih izgub ter predstavitev merilniškega diagrama

Izgube celotnega stroja  $H_{izg}$  smo izračunali z enačbo (17) in prikazali v diagramu  $y_2/H_{izg}$  (sl. 8). Pri vtoku vode smo merili vtočno statično in na iztoku iztočno statično fizikalno veličino, torej bruto padec, od katerega smo odšteli statični in dinamični del padca, torej čisti padec, po spodnji enačbi (18) [6]:

$$H_{izg} = H_b - H_n \quad (17)$$

$$H_{izg} = [H_{VG} - H_{IG}] - \left[ (H_{sv}) - (H_{si}) + \left[ Q_0^2 / 2g \cdot (1/A_1^2 - 1/A_2^2) \right] \right] \quad (18).$$



Sl. 2. Diagram meritve izkoristka kaplanove turbine pri zajamčenem padcu  $H_{gar}$

V diagramu (sl. 2) smo prikazali meritev s primerjalno metodo pri zajamčenem čistem padcu  $H_{gar}$ . Prikazana sta izkoristek turbine  $\eta_{tur}/\eta_{tur}$  in zajamčena turbinska moč  $P_{gar}$  v odvisnosti od zajamčenega pretoka  $Q_{gar}$ .

Običajno se pri kaplanovih turbinah s kratkim pretočnim sistemom vse fizikalne veličine preračunajo na povprečni čisti padec za določitev krivulje upravljanja vodilnika in gonilnika. V zgornjem diagramu (sl. 2) smo vse vrednosti preračunali na zajamčeni čisti padec v skladu z enačbami v priporočilu SIST EN 60041 [1], ki so prikazane v poglavju 1.4. Tako izračunamo tudi rezultate na povprečni čisti padec za upravljanje vodilnika in gonilnika.

## 2.2 Določitev upravljalnega razmerja med vodilnikom in gonilnikom ter padcem in pretokom vode skozi turbino

V skladu s primerjalnimi meritvami smo določili v modelnem školjčnem diagramu posameznega propelerja  $y_3$  (kot gonilnika  $\beta$ ) delovalno točko razmerja vodilnika  $y_2$  ( $A_0$ ) pri izmerjenem padcu  $H_n$  ( $\psi$ ) (sl. 3). Glede na to, da so se optimumi izkoristkov ujemali z odprtji, smo na podlagi dveh meritev odbrali delovalne diagrame pri posameznem izmerjenem padcu (sl. 3).

To pomeni, da smo v diagramu vsakega modelnega propelerja vrisali v izmerjeni točki padca  $H_n$  ( $\psi$ ) odprtje vodilnika  $y_2$  ( $A_0$ ). Skozi dve izmerjeni točki smo potegnili premico, ki je presekala preostale padce, na katerih smo odbrali posamezna relativna

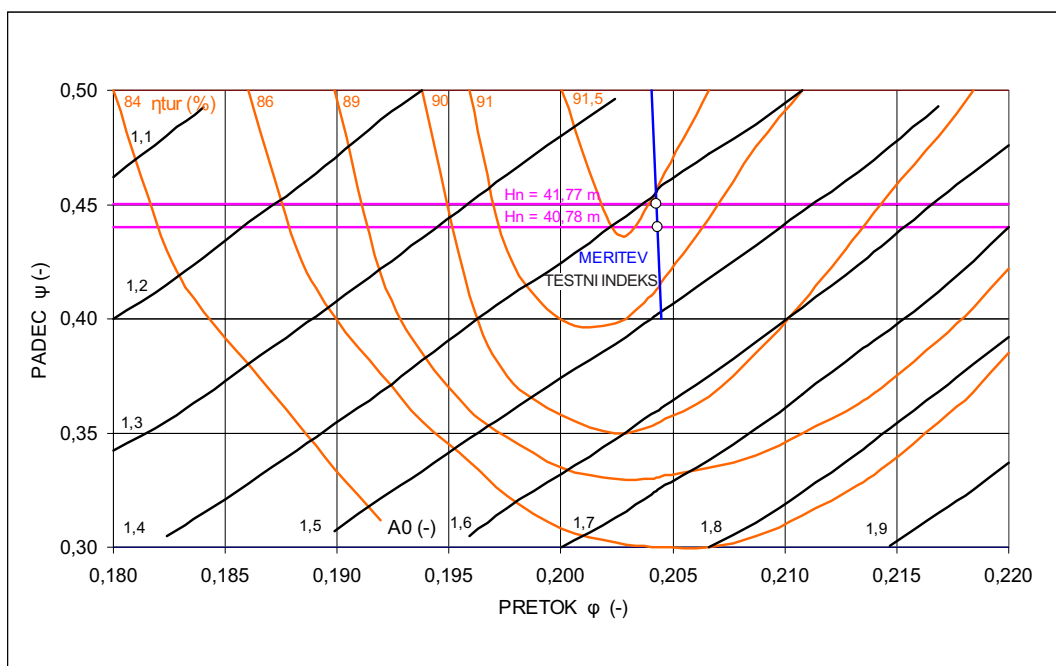
odprtja  $A_0$  in jih preračunali v absolutna odprtja vodilnika. Na modelnem školjčnem diagramu  $\beta = 20^\circ$  (sl. 3) smo prikazali izmerjeni točki, na katerih so bila odbrana odprtja. Iz ugotovitve, da iz modelnih školjčnih diagramov lahko določimo povezavo odprtij glede na različne padce, smo v nadaljevanju prikazali diagram krmiljenja, ki vsebuje odbrane veličine  $y_2/y_3$  na petih padcih  $H_n$  (sl. 9).

V diagramu (sl. 9) je vrisana tudi krivulja delovalnega razmerja  $y_2/y_3$ , ki seka izračunane neto padce. Na podlagi primerjalne metode propelerjev in izmerjenih vrednosti smo narisali obratovalni diagram (sl. 4).

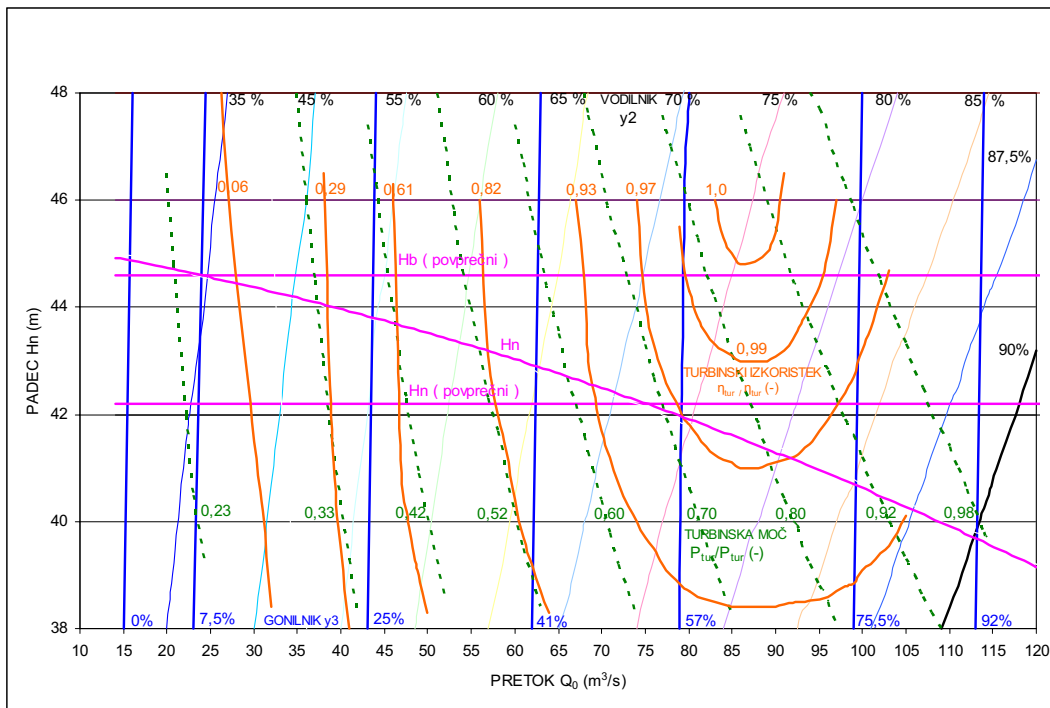
Na obratovalnem školjčnem diagramu (sl. 4) je prikazana krivulja spreminjajočega se čistega padca v odvisnosti od obremenjevanja turbine. Diagram (sl. 4) je narisana na temelju izmerjenih rezultatov posameznih propelerjev turbine brez preračunavanja na povprečni ali zajamčeni čisti padec. Razlika med izmerjenimi in povprečnimi čistimi padci je tako velika, da ni mogoče upravljati vodilnika in gonilnika v skladu s priporočili SIST EN 60041 [1].

Tlačne izgube in dinamični čisti padec se v pretočnem traktu spreminjajo v odvisnosti od pretoka. Zato smo v nadaljevanju prikazali, kako smo s turbinskim krmilnim sistemom rešili problem delovanja turbine na trenutnem padcu.

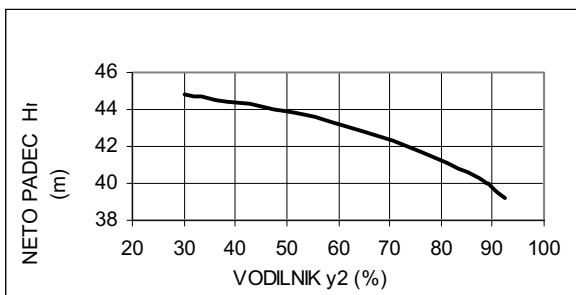
Na naslednjih straneh je prikazan diagram razmerja vodilnik/gonilnik skozi optimume (sl. 6) pri različnih padcih. Prikazali smo tudi preostale pomožne diagrame, na podlagi katerih smo določili potrebne parametre:  $y_2/H_n$  (sl. 5),  $y_2/H_{din*}$  (sl. 7),  $y_2/H_{izg}$  (sl. 8),  $y_2/y_3 f(H_n)$  (sl. 9) in  $y_2/Q_{of}(H_n)$  (sl. 10).



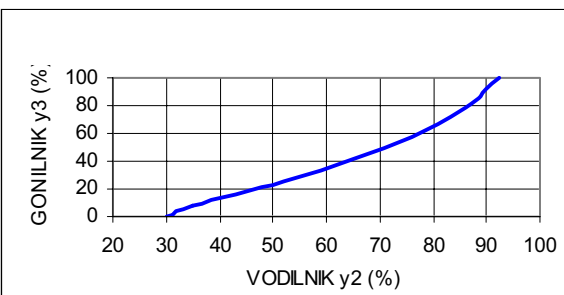
Sl. 3. Modelni školjčni diagram  $\beta = 20^\circ$



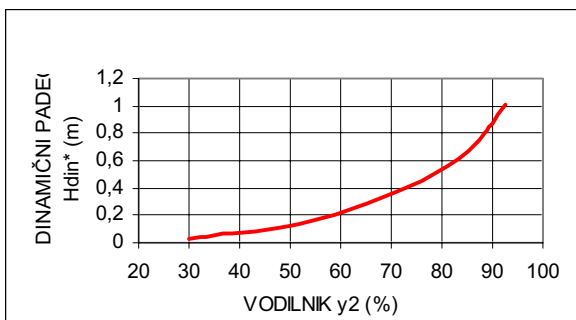
Sl. 4. Obratovalni školjčni diagram kaplanove turbine



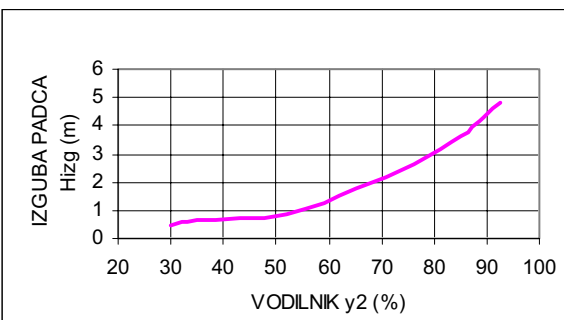
Sl. 5. Diagram odvisnosti neto padca od odprtja vodilnika



Sl. 6. Diagram optimalnega razmerja  $y_2/y_3$  pri obratovanju



Sl. 7. Diagram dinamičnega padca pri obremenjevanju



Sl. 8. Diagram izgube padca pri obremenjevanju

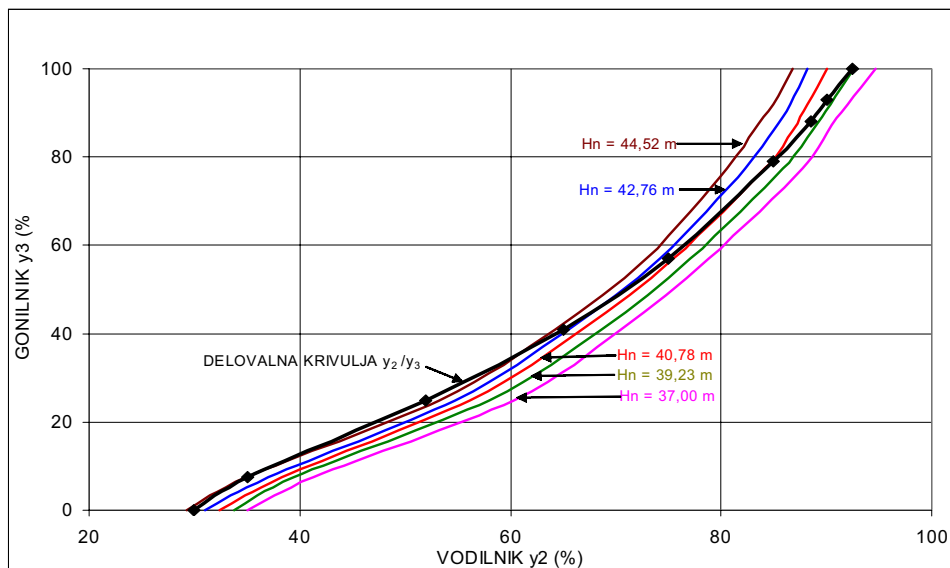
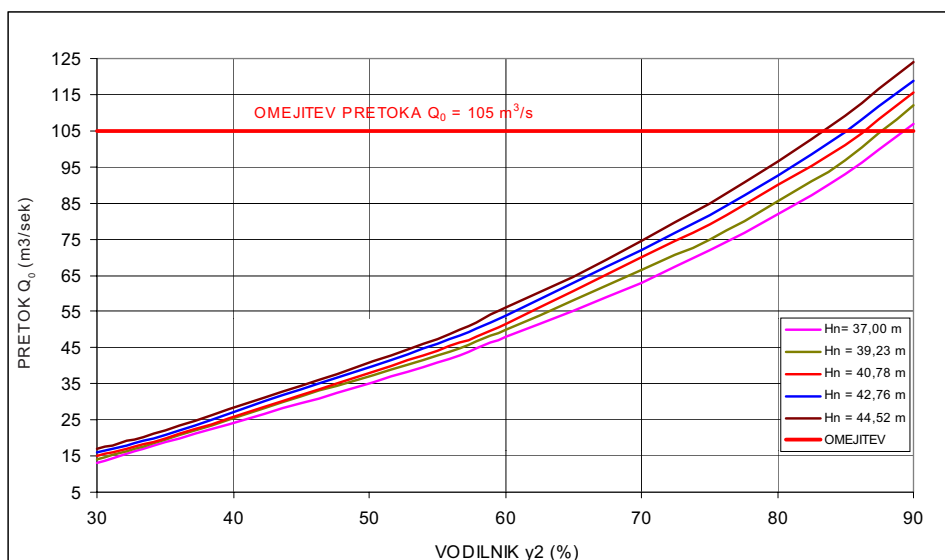
**2.3 Upravljanje gonilnika z uvajanjem drugega približka čistega padca in omejitvev pretoka**

V školjčnem obratovalnem diagramu (sl. 4) sta vrisana povprečni celotni in čisti padec ter delovalna krivulja čistih padcev  $H_n$ .

Glede na to, da smo iz meritev izračunali

dinamični padec vode v odvisnosti od pretoka vode skozi turbino, ki je povezana z odvisnostjo odprtja vodilnika, smo lahko za prvi preračun čistega padca  $H_n^*$  uporabili vrednosti iz diagrama (sl. 7). Na podlagi obratovalnega školjčnega diagrama smo narisali diagram odvisnosti pretoka pri različnih padcih v odvisnosti odprtja vodilnika  $y_2/Q_{of}(H_n)$  (sl. 10). Torej



Sl. 9. Skupni diagram krmiljenja  $y_2 / y_3$  z vrisano delovalno krivuljo

Sl. 10. Diagram odvisnosti pretoka od odprtja vodilnika in čistega padca

smo lahko pri nekem odprtju vodilnika in izračunanem prvem približku čistega padca  $H_n^*$  določili pretok vode skozi turbino  $Q_0$ . Ta pretok smo nato uporabili za ponovni preračun dinamičnega padca in preračunali drugi natančnejši čisti padec  $H_n$ .

V diagramu (sl. 10) določeni pretok  $Q_0$  smo uporabili tudi kot povratno zvezo za omejitev odprtja vodilnika in za prikazovanje pretoka skozi turbino.

Na podlagi zgornjih parametrov smo torej določili gonilniško odprtje v odvisnosti vodilniškega odprtja na podlagi drugega približka čistega padca v skladu z diagramom  $y_3 = f(y_2, H_n)$  (sl. 9).

Na sliki 9 smo prikazali delovalno krivuljo, po kateri se gonilnik upravlja v odvisnosti odprtja vodilnika in trenutnega padca.

Z nastavitvijo obratovalnega razmerja vodilnika in gonilnika pri trenutnem padcu vode smo

izboljšali hidravlična natočna razmerja in zmanjšali pojav povratnega tlačnega udara v sesalni cevi ([6] do [8]).

Na podlagi zgornjega opisa smo v nadaljevanju prikazali blokovno shemo krmiljenja gonilnika (sl. 11) [9].

Omeniti moramo, da smo za obdelavo odvisnosti v turbinskem krmilnem sistemu uporabili točke izmerjenih petih padcev. Pri obdelavi podatkov smo upoštevali devet padcev, izmerjenih s primerjalno metodo.

Za določitev pretoka  $Q_0$  smo upoštevali v školjčnem diagramu pet čistih padcev, tako kakor pri določitvi diagrama odvisnosti vodilnika in gonilnika skozi optime pri enakih petih padcih. Tako je bilo programerju v turbinskem krmilnem sistemu, po spodnji blokovni shemi (sl. 11) [9], lažje obdelati zahtevane funkcije.

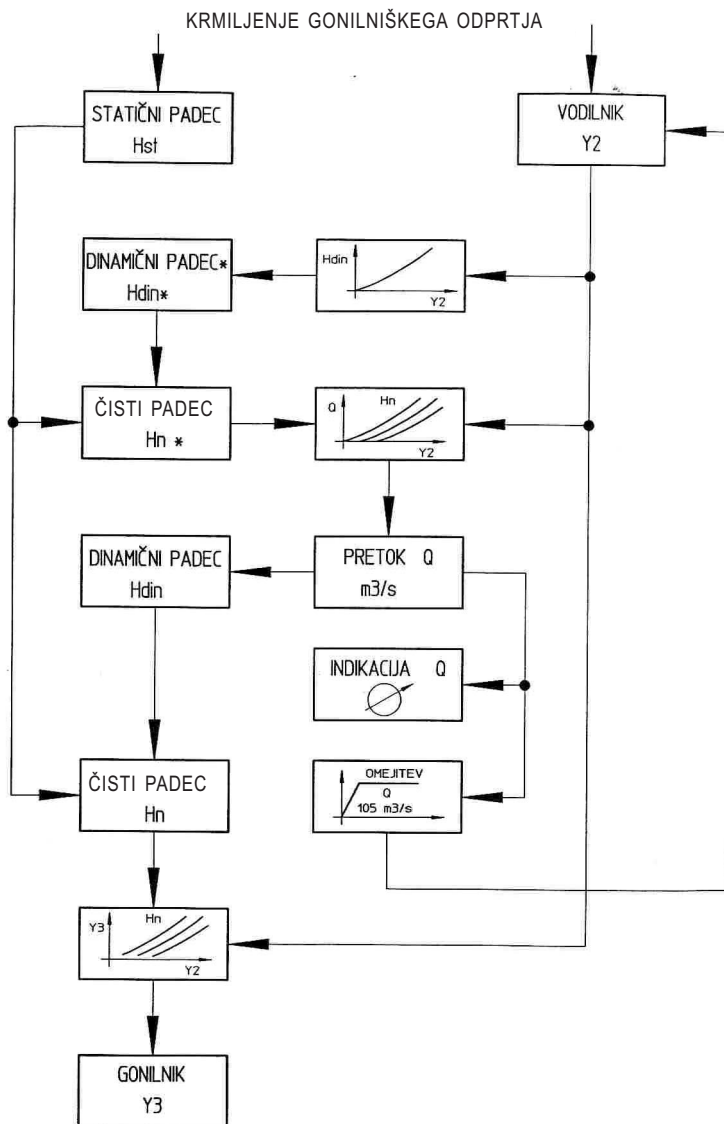
### 3 SKLEP

Na podlagi zgoraj opisanih meritev smo v turbinski krmilnik vnesli vse potrebne parametre za optimalno delovanje agregata. Potek delovanja smo spremljali z merilniškim sistemom LAB VIEW. Meritve so bile opravljene v skladu z mednarodnimi standardi. Izmerjeni rezultati so bili v skladu s tolerancami in priporočili omenjenih standardov.

### 4 OZNAKE

$A_0$	brezrazsežno odprtje vodilnika	-
$A_1$	vtočni prerez	m <sup>2</sup>
$A_2$	iztočni prerez	m <sup>2</sup>
$dr$	prirastek polmera	m
$g$	težnost	ms <sup>-2</sup>
$H_b$	celotni padec	m
$H_{din}$	dinamični padec	m
$H_{din*}$	približek dinamičnega padca	m

$H_{gar}$	zajamčeni čisti padec	m
$H_{izg}$	izguba padca	m
$H_n$	čisti padec	m
$H_{n*}$	prvi približek čistega padca	m
$H_{st}$	statična tlačna višina pri iztoku	m
$H_{stl}$	statični padec pri iztoku	m
$H_{stl}$	statični padec pri vtoku	m
$H_{sv}$	statična tlačna višina pri vtoku	m
$H_{VG}$	gladina vode pri vtoku	m.n.v.
$k$	konstanta stisljivosti vode	bar <sup>-1</sup>
$k_0$	konstanta za preračun pretoka	-
$P^{gar}$	zajamčena turbinska moč	MW
$P^{gen}$	generatorska moč	MW
$P^{tur}$	turbinska moč	MW
$p$	vodni tlak, merjen pred turbino	bar
$p_1$	vodni tlak pri vtoku v turbino	bar
$p_2$	vodni tlak pri iztoku iz turbine	m
$r$	polmer	m
$r_n$	notranji polmer spiralnega okrova	m
$r_z$	zunANJI polmer spiralnega okrova	m



Sl. 11. Blokovni diagram krmiljenja gonilniškega odprtja

$r_1$	polmer meritve diferencialnega tlaka $\Delta h_{WK}$ v točki 1	m	$y_2$	relativna lega servomotorja vodilnika	%
$r_2$	polmer meritve diferencialnega tlaka $\Delta h_{WK}$ v točki 2	m	$y_3$	relativna lega servomotorja gonilnika	%
$T$	temperatura vode	°C	$Q_0$	pretok vode	$m^3s^{-1}$
$H_{IG}$	gladina vode pri iztoku	m	$Q^{gar}$	zajamčeni pretok vode	$m^3s^{-1}$
$v_1$	povprečna vtočna hitrost vode	m/s	$\beta$	kot nagiba gonilnikovih lopat	°
$v_2$	povprečna iztočna hitrost vode	m/s	$\eta_{gen}$	izkoristek generatorja	%
$z$	nadmorska višina	m	$\eta_{tur}$	izkoristek turbine	%
$z_1$	točka energijskih veličin pred turbino -		$\rho_v$	gostota vode	$kgm^{-3}$
$z_2$	točka energijskih veličin za turbino -		$\cos \Phi$	faktor generatorske moči	-
$x_1$	višinska razlika od sredine gonilnika do tlačnega zaznavala - vtok	m	$\varphi$	brezrazsežno št. pretoka -	
$x_2$	višinska razlika od sredine gonilnika do tlačnega zaznavala - iztok	m	$\varphi$	geografska širina	°
			$\varphi$	kot izbranega prereza v spirali	°
			$\psi$	brezrazsežno število čistega padca -	

## 5 LITERATURA

- [1] SIST EN 60041 field acceptance tests to determine the hydraulic performance of hydraulic turbines.
- [2] SIST EN 60308 international code for testing of speed governing system for hydraulic turbines.
- [3] SIST EN 60545 guide for commissioning, operation and maintenance of hydraulic turbines.
- [4] Schweiger, F. (1978) Research work on flow measurement by the Winter Kennedy method. Proceeding of Flomeko.
- [5] Schweiger, F. and V. Kerčan (1985) Winter–Kennedijeva metoda za merjenje pretoka na hidroelektrarnah. *Automatika*.
- [6] Calvin, V. D. and K. E. Sorensen (1969) Handboock of applied hydraulics. *Mc Graw–Hill Book Company*.
- [7] Streeter, V.L. (1961) Handbook of fluid dynamics. *Mc Graw–Hill Book Company*.
- [8] Jordan, V. (1983) Prehodni režimi v hidravličnih sistemih. *Partizanska knjiga*.
- [9] Trebše, A.J., Poročili o preizkusih na gradbišču št. 1351 in 1375 - Litostroj e.i. 2002/2003

Avtorjev naslov: Andrej J. Trebše

Litostroj e.i.  
Litostrojska cesta 40  
1000 Ljubljana  
andrej.trebse@litostroj-ei.si

Prejeto: 25.11.2003  
Received:

Sprejeto: 8.4.2004  
Accepted:

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

## Osebnosti vesti

### Personal Events

#### Magisteriji, specializacije, diplome

##### MAGISTERIJI

Na Fakulteti za strojništvo Univerze v Ljubljani sta z uspehom zagovarjala svoji magistrski deli:

*dne 23. marca 2004:* **Borut Kecelj**, z naslovom: "Celovit računalniško podprt pristop k izdelavi oblikovalnih orodij";

*dne 24. marca 2004:* **Štefan Žun**, z naslovom: "Ekološko sledenje razvoja lokalnih skupnosti".

S tem sta navedena kandidata dosegla akademsko stopnjo magistra znanosti.

##### SPECIALIZACIJE

Na Fakulteti za strojništvo Univerze v Mariboru sta z uspehom zagovarjala svoji specialistični deli:

*dne 10. marca 2004:* **Dejan Studenčnik**, z naslovom: "Pomen in vpliv različnih načinov obnove gravure kovaških orodij na vzdržljivost gravure";

*dne 11. marca 2004:* **Fran Rogelšek**, z naslovom: "Upravljanje kakovosti v velikoserijski proizvodnji".

##### DIPLOMIRANISO

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

*dne 1. marca 2004:* Simon BRLEK;

*dne 29. marca 2004:* Polona TERŽAN.

\*

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

*dne 11. marca 2004:* Jožef BLAŽIČ, Jože KOLANDER, Aleš MLEKUŽ, Jože PINOZA, Marijan ŠTEFANČIČ, Jože ZAKOTNIK;

*dne 12. marca 2004:* Aleš BAMBIČ, Marjan BRULC, Andrej GREBENC, Dominik KALUŽA, Rok STARC.

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

*dne 25. marca 2004:* Predrag RAĐEVIĆ, Rudi REPNIK, Edin SELMAN.

## Navodila avtorjem

### Instructions for Authors

Članki morajo vsebovati:

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

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

#### Vsebina članka

Članek naj bo napisan v naslednji obliki:

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

#### Oblika članka

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

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

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

#### Enote in okrajšave

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

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

Papers submitted for publication should comprise:

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

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

#### The format of the paper

The paper should be written in the following format:

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

#### The layout of the text

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

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

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

#### Units and abbreviations

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

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



**Slike**

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

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

Vse označbe na slikah morajo biti dvojezične.

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

**Preglednice**

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

Vsi podnaslovi preglednic morajo biti dvojezični.

**Seznam literature**

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

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

**Podatki o avtorjih**

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

**Sprejem člankov in avtorske pravice**

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

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

Rokopisi člankov ostanejo v arhivu SV.

Vsa nadaljnja pojasnila daje:

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

**Figures**

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

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

All figure captions must be bilingual.

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

**Tables**

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

All table captions must be bilingual.

**The list of references**

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

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

**Author information**

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

**Acceptance of papers and copyright**

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

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

Papers will be kept in the archives of the JME.

You can obtain further information from:

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