

STROJNIŠKI

VESTNIK

1

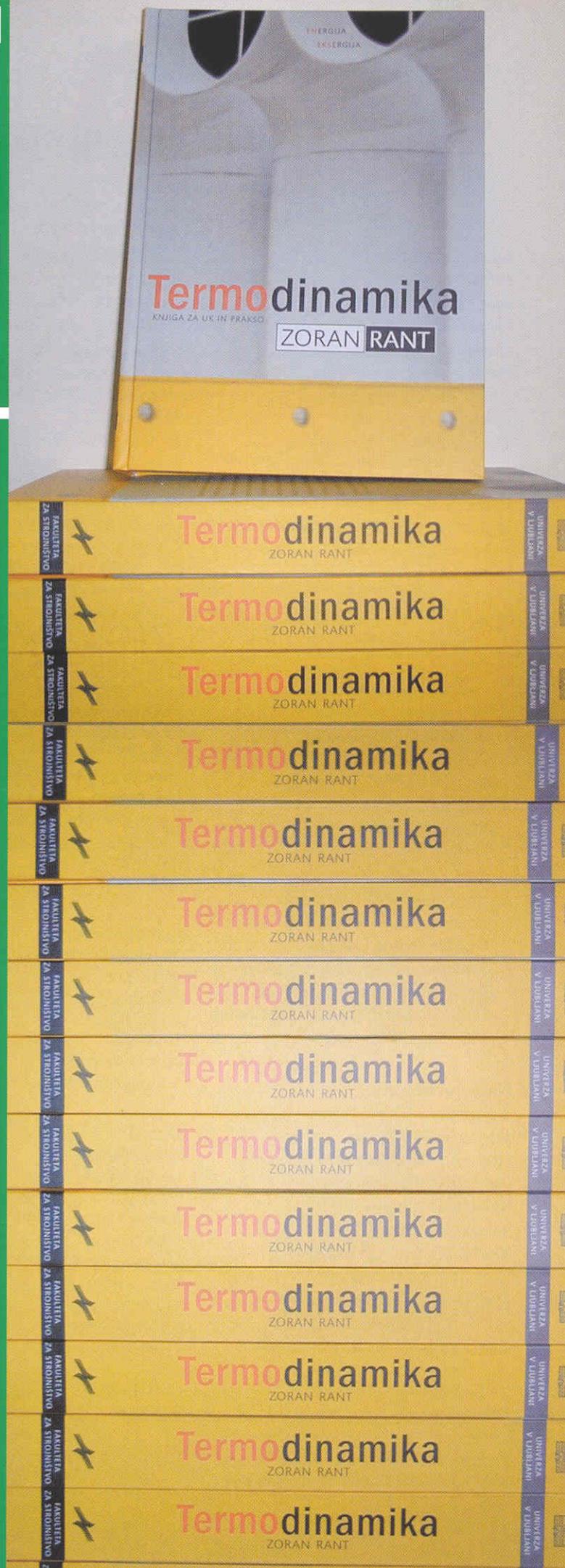
JOURNAL OF MECHANICAL ENGINEERING

strani - pages 1 - 68

ISSN 0039-2480 . Stroj V . STJVAX

cena 800 SIT

1. Stabilnost antenskega stebra ob upoštevanju hkratnega delovanja lastne teže in zunanje obremenitve
The Stability of an Antenna Column under the Simultaneous Action of its Own Weight and on Effective Load
2. Ocenjevanje zahtevnosti postopkov
An Evaluation of Process Complexity
3. Spremljanje trenutne frekvenčne vsebine pri zagonu pralnega stroja
Monitoring the Instantaneous Frequency Content of a Washing Machine during Startup
4. Analiza temperatur in toplotne energije pri odrezavanju
An Analysis of Temperatures and Thermal Energy during Cutting
5. Značilnosti radialnih malih vodnih turbin s prečnim tokom
Characteristics of Cross-Flow Radial Mini-Hydro Turbines



Vsebina

Contents

Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering
letnik - volume 47, (2001), številka - number 1

Uvodnik

- Tuma, M.: Ob ponatisu prof. Zorana Ranta:
Termodinamika, knjiga za uk in prakso

2

Editorial

- Tuma, M.: Second Edition Prof. Zoran Rant's: Thermodynamics, Book for Learn and Practice

Razprave

- Saucha, J., Radoš, J., Ivaković, Č.: Stabilnost antenskega stebra ob upoštevanju hkratnega delovanja lastne teže in zunanje obremenitve
Vajde Horvat, R., Welzer Družovec, T., Rozman, I., Soković, M.: Ocenjevanje zahtevnosti postopkov
Simonovski, I., Boltežar, M.: Spremljanje trenutne frekvenčne vsebine pri zagonu pralnega stroja
Milfelner, M., Čuš, F.: Analiza temperatur in toplotne energije pri odrezavanju
Franjić, K.: Značilnosti radialnih malih vodnih turbin s prečnim tokom

4
15
28
45
53

Papers

- Saucha, J., Radoš, J., Ivaković, Č.: The Stability of an Antenna Column under the Simultaneous Action of its Own Weight and on Effective Load
Vajde Horvat, R., Welzer Družovec, T., Rozman, I., Soković, M.: An Evaluation of Process Complexity
Simonovski, I., Boltežar, M.: Monitoring the Instantaneous Frequency Content of a Washing Machine during Startup
Milfelner, M., Čuš, F.: An Analysis of Temperatures and Thermal Energy during Cutting
Franjić, K.: Characteristics of Cross-Flow Radial Mini-Hydro Turbines

62
65
67

Professional Literature

Personal Events

Instructions for Authors

Strokovna literatura

Osebne vesti

Navodila avtorjem

Uvodnik

Editorial

Ob ponatisu prof. Zorana Ranta: Termodinamika, knjiga za uk in prakso

Second Edition of Prof. Zoran Rant's: Thermodynamics, Book for Learning and Practice

Znanstveno zanimanje prof. Ranta je veljalo predvsem energijskim problemom. Čim bolj smotorno spreminjanje energije iz ene oblike v drugo je bila misel, ki ga je spremljala skoraj pri vseh teoretičnih in praktičnih raziskavah. Še dandanes so vredne branja njegove misli, ki jih je napisal leta 1957.

"Pogosto slišimo, da živimo v dobi tehnike. In vendar bi bilo morebitni pravilnejše, če bi imenovali novo razdobje, v katero človeštvo pravzaprav šele stopa, dobo energije, kakor sem to nekje bral. Energija je tisto gibalno, ki daje današnji tehnični časten pečat: po eni strani olajšuje človeku življenje in mu pomaga, hkrati pa mu omogoča graditev vedno novih tehničnih veledel. Razpolaganje z energijo in njena uporaba sta neposredno merilo za bogastvo in revščino narodov. Energija postaja tako najdragocenejše in najžlahtnejše blago - ves svet je lačen energije. Seveda je v manj razvitih ali zaostalih državah potreba po energiji razmeroma večja kakor v bolj in najbolj razvitih.

Reševanje energijskega vprašanja je predvsem težavno zaradi omejenosti virov energije ali pa znatnih sredstev, ki jih terja aktiviranje virov. Tudi mi se stalno bijemo z energijskimi težavami in si belimo glave z vprašanjem, od kod in kako preskrbeti vedno večje količine električne energije, ki jo potrebujejo gospodarstvo in naša domovina".

Prof. Rant je kot visokošolski učitelj ne le dvignil in izpopolnil študij termodinamike in procesne tehnike na nadpovprečno raven, ampak je znal pritegniti mlade ljudi v znanstveno delo na teh področjih. Bil je živahen in veder človek, ki je s svojim optimizmom in vero v uspeh pritegnil vsakega poslušalca. Študente, ki so se odločili za dodiplomski ali podiplomski študij pri njem, je znal navdušiti, ne samo z zanimivimi temami, ampak tudi s svojo osebnostjo. O svojem pedagoškem poslanstvu je prof. Rant leta 1959 razmišljjal takole:

"Pri profesorjih je temeljito poznavanje stroke samo del tako imenovane kvalifikacije. Profesor mora imeti celo vrsto moralnih lastnosti, ki mu

šele poleg znanja dajo avtoritetu pri slušateljih. On naj bo prvi in največji prijatelj študenta, kar pa seveda ni povezano s slabotnim popuščanjem pri študiju in celo pri izpitih. To prijateljstvo mora študent občutiti, za nas profesorje pa ni večjega zadovoljstva od zaupanja študentov v nas. Za zrelega moža ni nič lepšega od stalnega stika z mladino in zavest, da mladim ljudem dajemo nekaj, kar jim bo koristilo vse življenje. To je velik privilegij, ki ga je le malokdo deležen.

Profesor naj bi bil tudi dober pedagog. To je zelo kočljivo vprašanje, ker je znano, da pedagoške sposobnosti niso vedno povezane s solidnim znanjem in narobe. Seveda, za akademskega učitelja ima znanstvena in strokovna kvalifikacija prednost pred pedagoško. In tudi izkušnje kažejo, da se da na dobrni podlagi znanja sčasoma pridobiti vsaj zadovoljiva pedagoška zmožnost, ne pa nasprotno.

Profesor pa naj da študentom več kakor le golo in v tem primeru mrtvo znanje. To znanje mora biti pretkano z njegovo osebnostjo, mora nekako nositi njegov pečat. Profesor naj svojo snov predava z navdušenjem, njegova osebnost in njegov značaj morata izžarevati na študente. Profesorji in študenti, seveda po selekciji, sestavlajo nerazdružljivo celoto in ne dva ločena tabora. O problemih sodelovanja se sploh ne bi smelo govoriti - pri pravilnem gledanju obeh teh problemov sploh ni".

Rantova dela na področju teoretične in uporabne termodinamike so avtorju prinesla velik ugled in številna priznanja doma in v tujini. Leta 1964 ga je Slovenska akademija znanosti in umetnosti imenovala za svojega dopisnega člana, 1970 mu je Tehniška visoka šola na Dunaju, na kateri je leta 1926 diplomiral za strojnega inženirja, podelila "Johann Joseph Ritter von Prechtl Medaille", Društvo nemških inženirjev za procesno tehniko pa leta 1971 zelo ugledno odlikovanje "Arnold Eucken Medaille". Fakulteta za strojništvo Univerze v Ljubljani ga je uvrstila med svoje najpomembnejše profesorje in mu v avli glavne stavbe postavila spominsko ploščo. V

svetovno zakladnico znanja pa je prišel kot znanstvenik, ki je leta 1953 v termodinamiku uvedel in utemeljil pojem eksergije in pozneje še pojem anergije.

Prof. Rant je rad delal strokovno, bil je odličen znanstvenik, rad je imel mladino. V skoraj popolni meri je združeval v sebi lastnosti pronicljivega bistrega teoretika, praktičnega strokovnjaka in zelo dobrega pedagoga. Potrudil se je, da je pri svojih teoretičnih razglabljanjih vedno našel tudi neposredno povezavo s strokovno prakso. To je vredno poudariti, saj se v današnjem času znanosti pogosto pozablja, da mora biti strojništvo vedno ozko povezano s prakso.

Akademik prof. dr. Zoran Rant se je rodil leta 1904 v Ljubljani, 17 let je bil zaposlen v kemičnem koncernu Solvay & Co. v Tovarni sode v bosanskem Lukavcu, od 1946 do 1962 je bil redni profesor na sedanji Fakulteti za strojništvo, nato pa do svoje smrti 1972 redni profesor (ordinarius) na Tehnični univerzi Braunschweig.

Ponatis knjige prof. Zorana Ranta: Termodinamika, knjiga za uk in prakso je bil končan

prav za obletnico nekaterih dogodkov, ki so manj znani, vendar pa pomembni za študij strojništva na Slovenskem:

- pred 60 leti, 5. aprila 1941 je bil v Beogradu v tedanji kraljevini Jugoslaviji podpisani odlok o popolnem študiju strojništva Univerze v Ljubljani, ki pa se zaradi druge svetovne vojne ni takoj uresničil,
- pred 55 leti, 15. marca 1946 je bila slovesno odprta stará stavba sedanje Fakultete za strojništvo in
- pred 55 leti, 1. aprila 1946 je bil avtor knjige prof. dr. Zoran Rant izvoljen za rednega profesorja za teoretično strojесlovje na Univerzi v Ljubljani.

Prva izdaja tega temeljnega dela s področja uporabne termodinamike je že vrsto let razprodana, vendar je njena vsebina še vedno aktualna, knjiga velja na tem področju še vedno za najpomembnejše domače delo. Nova izdaja knjige je praktično nespremenjena, popravljene so le manjše tiskovne napake in posodobljeni nekateri simboli, na koncu knjige pa je dodana bio- in bibliografija avtorja knjige.

prof. dr. Matija Tuma

Stabilnost antenskega stebra ob upoštevanju hkratnega delovanja lastne teže in zunanje obremenitve

The Stability of an Antenna Column under the Simultaneous Action of its Own Weight and an Effective Load

Juraj Saucha - Jerko Radoš - Čedomir Ivaković

Prispevek obravnava določitev elastične stabilnosti antenskega stebra ob hkratnem delovanju lastne teže in zunanje vzdolžne tlačne obremenitve. Določitev kritične kombinacije lastne teže stolpa in vzdolžne tlačne sile temelji na rešitvi vodilne diferencialne enačbe stebra v obliki Maclaurinove vrste s hitro konvergenco zaradi uporabljene zamenjave. Dobijeni rezultati s kakovostjo natančne rešitve vodilne diferencialne enačbe so primerni za oceno natančnosti približne rešitve, ki predpostavlja linearno sodelovanje teže stebra in vzdolžne tlačne sile. Ugotovili smo, da so rezultati približne rešitve znotraj dveh odstotkov.

© 2001 Strojniški vestnik. Vse pravice pridržane.

(Ključne besede: stebri antenski, stabilnost, obremenitve kritične, enačbe diferencialne)

This paper deals with the determination of the elastic stability of an antenna column subjected to the simultaneous actions of its own weight and an effective load as an axial compressive force. The determination of the critical combination of the weight of the column and the axial compressive force was based upon the solution to the governing differential equation of the column in the form of a Maclaurin's series with a rapid convergence due to the introduced substitution. The obtained results, with a quality of the exact solution to the governing differential equation, were relevant for the evaluation of the accuracy of the approximate solution which assumed the linear interaction of the weight of the column and the axial compressive force. It has been established that the approximate solution differed from the results obtained in this paper by -2 %.

© 2001 Journal of Mechanical Engineering. All rights reserved.

(Keywords: antenna columns, stability, critical loads, differential equations)

0 UVOD

Antenski steber smo analizirali in oblikovali kot nosilec, saj je obremenjen upogibno zaradi prečne obremenitve (vihar), in tlak zaradi lastne teže in zunanje obremenitve. V običajni praksi zapleteno analizo stebra drugega reda nadomestimo s približno, ki uporablja povečevalni količnik. Največji moment drugega reda preprosto dobimo z množenjem največjega momenta prvega reda s tem količnikom ([1] in [2]). V naslednjem približku vse druge momente prerezov vzdolž antenskega stebra dobimo z množenjem prvih momentov s povečevalnim količnikom [6]. Da določimo vrednost povečevalnega količnika, moramo najprej preučiti stabilnost stebra, saj je povečevalni količnik odvisen od razmerja dejanske vzdolžne obremenitve in kritične vzdolžne sile stebra.

Določitev kritične vzdolžne sile antenskega stebra izhaja iz preučitve elastične

0 INTRODUCTION

An antenna column has to be analyzed and designed as a beam column because it is subjected to both bending, due to transverse loading, and compression, due to its own weight and an effective load. In practice, the complicated second-order analysis of a beam column is replaced, in an approximate sense, by the use of the magnification or amplification factor. The maximum second-order moment is obtained simply by multiplying the maximum first-order moment by this factor ([1] and [2]). In a further approximation, all the secondary moments along the antenna column can be obtained by increasing the primary moments by the amplification factor [6]. To determine the value of the amplification factor the stability of the column has to be analyzed first, because the amplification factor is a function of the ratio of the actual axial load to the critical axial load of the column.

The determination of the critical axial load of the antenna column results from a study of the elastic

stabilnosti nosilnega stebra z zvezno spremenljivim prerezom ob hkratnem delovanju njegove lastne teže (porazdeljena vzdolžna obremenitev) in zunanje obremenitev (vzdolžna tlačna sila, delujoča na prostem koncu). Približno vrednost kritične kombinacije teže stebra in vzdolžne tlačne sile dobimo ob predpostavki linearne povezanosti teže stebra in vzdolžne tlačne sile. To kritično kombinacijo izrazimo s kritično težo stebra in kritično vzdolžno tlačno silo, ki deluje na steber zanemarljive lastne teže [6].

Kritično vzdolžno tlačno silo nosilnega stebra z zvezno spremenljivim prerezom določimo po razcepnom postopku z reševanjem vodilne diferencialne enačbe z uporabo Besselovih funkcij ([4] in [7]). Kritično lastno težo takega stebra približno določimo (vendar z veliko stopnjo natančnosti) z reševanjem vodilne diferencialne enačbe v obliki neskončne potenčne vrste [5], ali pa z uporabo energijskega postopka po Galerkinu [6]. Približne energijske postopke lahko uporabimo za določitev kritične kombinacije lastne teže stebra in vzdolžne tlačne sile, npr. po postopku Rayleigh-Ritz [3].

Prikazana proučitev elastične stabilnosti antenskega stebra, obravnavanega kot nosilni steber z zvezno spremenljivim prerezom, izpostavljenim hkratnemu delovanju lastne teže in vzdolžne tlačne sile, uporablja razcepni postopek. Določitev kritične kombinacije teže stebra in vzdolžne tlačne sile uporablja rešitev vodilne diferencialne enačbe v obliki Maclaurinove vrste. Določitev kritične obremenitev je izvedena z največjo natančnostjo. Dobljeni rezultati s kakovostjo natančne rešitve vodilne enačbe so primerni za ovrednotenje natančnosti približne rešitve, ki predpostavlja linearno povezanost teže stebra in vzdolžne tlačne sile. To ovrednotenje je namen pričajočega proučevanja.

1 POSTAVITEV VODILNE DIFERENCIALNE ENAČBE

Slika 1 prikazuje steber z zvezno spremenljivim prerezom. Vztrajnostni moment prereza stebra se vzdolž smeri x spreminja parabolično:

$$I(x) = I_2 \left(\frac{a+x}{a+l} \right)^n \quad (1)$$

in porazdeljena vzdolžna sila zaradi lastne teže stebra je prav tako parabolična:

$$q_G(x) = q_{G2} \left(\frac{a+x}{a+l} \right)^p \quad (2)$$

stability of a cantilevered column with a continuously changing cross-section subjected to the simultaneous action of its own weight (a distributed axial load) and the effective load (an axial compressive force acting at the free end). The approximate value of the critical combination of the weight of the column and the axial compressive force can be obtained by assuming a linear interaction of the weight of the column and the axial compressive force. This critical combination is expressed by the critical weight of the column and the critical axial compressive force acting on the column with a negligible weight of its own [6].

The critical compressive axial force of the cantilevered column with a continuously changing cross-section can be determined, in a bifurcation approach, by solving the governing differential equation by means of Bessel functions ([4] and [7]). The critical intrinsic weight of such a column can be determined approximately (yet with a high degree of accuracy) by a solution to the governing differential equation in the form of an infinite power series [5] or, using an energy approach, by Galerkin's method [6]. The approximate energy methods can be used for determining the critical combination of the intrinsic weight of the column and the axial compressive force, for instance the Rayleigh-Ritz method [3].

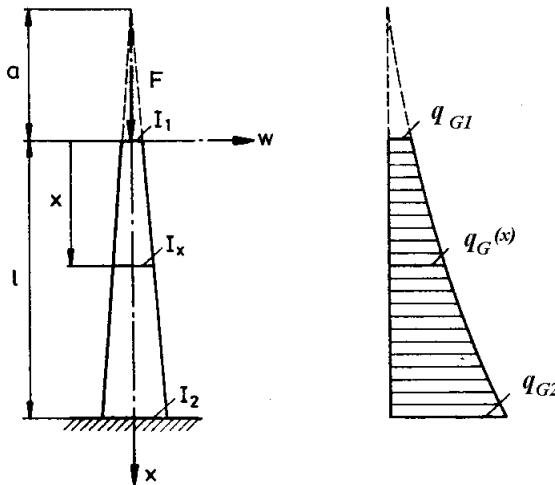
The presented study of the elastic stability of an antenna column, treated as a cantilevered column with a continuously changing cross-section subjected to the simultaneous action of its own weight and the axial compressive force, uses the bifurcation approach. The determination of the critical combination of the weight of the column and the axial compressive force is determined from the solution to the governing differential equation in the form of a Maclaurin's series. The determination of the critical load has been worked out with maximum precision. The obtained results, with a quality of the exact solution to the governing equation, are relevant for the evaluation of the accuracy of the approximate solution assuming the linear interaction of the weight of the column and the axial compressive force. This evaluation is the aim of this study.

1 FORMULATION OF THE GOVERNING DIFFERENTIAL EQUATION

Fig. 1 shows a cantilevered column with a continuously variable cross-section. The moment of inertia of the column cross-section varies along the x axis in accordance with the parabolic law:

$$I(x) = I_2 \left(\frac{a+x}{a+l} \right)^n \quad (1)$$

and the distributed axial load due to the intrinsic weight of the column in accordance with the parabolic law:



Sl. 1. Steber z zvezno spremenljivim prerezom
Fig. 1. Column of variable cross-section

kjer sta n in p nespremenljiva, odvisno od geometrijske oblike stebra in njegovega prereza.

Ravovesna enačba stebra ima obliko [6]:

where n and p are constants depending on the geometry of the column and its cross-section.

The equilibrium equation of this column takes the form [6]:

$$[EI(x)w'']'' + F_a(x)w'' + q_G(x)w' = 0 \quad (3),$$

kjer so $(\)' = \frac{d}{dx}(\), (\)'' = \frac{d^2}{dx^2}(\)$ in

where $(\)' = \frac{d}{dx}(\), (\)'' = \frac{d^2}{dx^2}(\)$ and

$$F_a(x) = F + \int_0^x q_G(x)dx \quad (4).$$

Z vstavitvijo (4) v (3) dobimo po integraciji (integracija tretjega člena po delih):

Substituting (4) into (3) after integrating (including integrating by parts of the third term) gives:

$$[EI(x)w'']'' + Fw' + w' \int_0^x q_G(x)dx + C_1 = 0 \quad (5)$$

Ob predpostavitvi majhnih pomikov w , lahko prečno silo F_T izrazimo [1]

Assuming we have small deflections w , the transverse force F_T can be expressed as [1]:

$$F_T = F_L w' + F_Q \quad (6),$$

kjer je vzdolžna sila:

where the longitudinal force is:

$$F_L = -F_a = -F - \int_0^x q_G(x)dx \quad (7)$$

in strižna sila:

and the shearing force is:

$$F_Q = \frac{dM}{dx} = \frac{d}{dx}[-EI(x)w''] = -[EI(x)w'']' \quad (8).$$

Za $x = 0, F_L = -F$ in $F_T = 0$, dobimo:

For $x = 0, F_L = -F$ and $F_T = 0$:

$$F_Q(0) - Fw'(0) = 0 \quad (9).$$

Prav tako je:

Further:

$$F_Q(0) = \left(\frac{dM}{dx} \right)_{x=0} = \frac{d}{dx}[-EI(x)w'']_{x=0} = -E \left[\frac{dI(x)}{dx} \right]_{x=0} w''(0) - EI(0)w'''(0) \quad (10).$$

Upogibni moment M je nič na prostem koncu stebra. Tako je:

The bending moment M vanishes at the free end of the column. Hence:

$$M(0) = -EI(0)w''(0) = 0 \quad (11)$$

in zato:

and thus:

$$w''(0) = 0 \quad (12)$$

Z vstavitevijo (12) v (10) dobimo:

Substituting (12) into (10) gives:

$$F_G(0) = -EI(0)w'''(0) \quad (13)$$

in (16) v (9) daje:

and substituting (16) into (9) gives:

$$EI(0)w'''(0) + Fw'(0) = 0 \quad (14).$$

Enačba (5) za $x = 0$ dobi obliko:

Equation (5) for $x = 0$ takes the form:

$$Ew''(0) \left[\frac{dI(x)}{dx} \right]_{x=0} + EI(0)w'''(0) + Fw'(0) + C_1 = 0 \quad (15).$$

Upoštevajoč (14) in (12) sledi:

Considering (14) and (12), it follows that:

$$C_1 = 0$$

Integral tretjega člena v enačbi (5), upoštevajoč (2), daje:

The integral in the third term of equation (5), considering (2), yields:

$$\int_0^x q_G(x)dx = \frac{q_{G2}}{(a+l)^p} \cdot \frac{(a+x)^{p+1} - a^{p+1}}{p+1} \quad (16).$$

Teža stebra je:

The weight of the column is:

$$F_G = \int_0^l q_G(x)dx = \frac{q_{G2}}{(a+l)^p} \cdot \frac{(a+l)^{p+1} - a^{p+1}}{p+1} \quad (17)$$

Vstavitev (1) v (16) daje:

substituting (17) into (16) gives:

$$\int_0^x q_G(x)dx = F_G \frac{(a+x)^{p+1} - a^{p+1}}{(a+l)^{p+1} - a^{p+1}} \quad (18).$$

Če (1) in (18) vstavimo v (5), dobimo po deljenju z $EI_2/(a+l)^n$

If (1) and (18) are substituted into (5), it follows after dividing by $EI_2/(a+l)^n$ that:

$$\left[(a+x)^n w'' \right]' + \frac{F}{EI_2} (a+l)^n w' + \frac{F_G}{EI_2} (a+l)^n \frac{(a+x)^{p+1} - a^{p+1}}{(a+l)^{p+1} - a^{p+1}} = 0 \quad (19).$$

Če uvedemo konstanti k_1 in k_2 , dobimo:

If constants k_1 and k_2 are introduced as follows:

$$k_1 = \frac{F_G}{EI_2} (a+l)^n \frac{1}{(a+l)^{p+1} - a^{p+1}} \quad (20),$$

$$k_2 = \frac{F}{EI_2} (a+l)^n \quad (21).$$

Vstavitev k_1 in k_2 v (19) daje:

substitution of k_1 and k_2 into (19) gives:

$$\left[(a+x)^n w'' \right]' + \left\{ k_1 \left[(a+x)^{p+1} - a^{p+1} \right] + k_2 \right\} w' = 0 \quad (22).$$

2 REŠITEV VODILNE DIFERENCIJALNE ENAČBE

Natančna rešitev enačbe (22) ne obstaja. Rešitev v obliki Maclaurinove vrste tudi ni ustrezna.

2 SOLUTION TO THE GOVERNING DIFFERENTIAL EQUATION

There is not an exact solution to equation (22). The solution in the form of a Maclaurin's series has not been

Konvergenca vrste je odvisna od zveze $I_2/I_1 < 2^n$, kar omejuje uporabnost rešitve na stebre z majhno koničnostjo. Poleg tega je konvergenca zelo počasna, kar zahteva izračunavanje velikega števila členov vrste.

Zato smo, da bi dobili vrsto s hitro konvergenco, tudi za velika razmerja I_2/I_1 , uporabili nadomestitev:

$$t = -b \cdot \ln\left(1 + \frac{x}{a}\right) \quad (23),$$

kjer je b ustrezna konstanta. Če zapišemo:

$$\frac{dw}{dt} = v, \frac{d^2w}{dt^2} = v', \frac{d^3w}{dt^3} = v'' \quad (24),$$

dobi enačba (22) obliko:

$$v'' - \frac{n-3}{b}v' - \frac{n-2}{b^2}v + K_1 \left[e^{(n-p-3)\frac{1}{b}} - e^{(n-2)\frac{1}{b}} \right]v + K_2 e^{(n-2)\frac{1}{b}}v = 0 \quad (25),$$

kjer sta

$$K_1 = k_1 \frac{a^{(p+3-n)}}{b^2} \quad (26),$$

$$K_2 = k_2 \frac{a^{-(n-2)}}{b^2} \quad (27).$$

Rešitev enačbe (25) lahko iščemo v obliko Maclaurinove vrste:

$$v = v_0 + \frac{t}{1!}v'_0 + \frac{t^2}{2!}v''_0 + \dots + \frac{t^r}{r!}v_0^{(r)} + \dots \quad (28).$$

Odvode $v_0^{(r)} = [v^{(r)}]_{t=0}$ lahko določimo po naslednjem postopku. Iz robnih pogojev $w' = C_2$ za $x = 0$ (strmina elastične krivulje na prostem koncu stebra) sledi ob upoštevnaju $t(x=0) = -b \cdot \ln(1+0) = 0$ po (23):

$$\left(\frac{dw}{dx}\right)_{x=0} = -\frac{b}{a}v_0 e^{\frac{0}{b}} = C_2$$

in zato:

$$v_0 = -\frac{a}{b}C_2 = C \quad (29).$$

Iz robnega pogoja $w''(x=0) = 0$, zaradi $M(x=0) = 0$ (upogibni moment na prostem koncu stebra), sledi ob upoštevanju $t(x=0) = 0$:

$$\left(\frac{d^2w}{dx^2}\right)_{x=0} = \frac{b^2}{a^2}v'_0 e^{\frac{0}{b}} + \frac{b}{a^2}v_0 e^{\frac{0}{b}} = 0$$

in zato:

and hence:

$$v'_0 = -\frac{1}{b}C \quad (30).$$

Iz (25), upoštevajoč $t(x=0) = 0$ ter (29) in (30), izhaja:

$$v''_0 = \frac{1}{b^2}C \quad (31).$$

Zaporedno odvajanje v'' , izraženo iz (25) za

satisfactory. The convergence of the series was conditioned by the relation $I_2/I_1 < 2^n$, which limited the application of the solution to the columns with small conicity. In addition, the convergence was very slow, which meant that a lot of terms in the series had to be calculated.

Therefore, with the aim of obtaining a series with a rapid convergence, which exists even for the big ratio I_2/I_1 , a substitution t was introduced:

Here b is an arbitrary constant. If it is written:

equation (22) takes the form:

The solution to equation (25) can be sought in the form of a Maclaurin's series:

The derivatives $v_0^{(r)} = [v^{(r)}]_{t=0}$ can be determined as follows. From the boundary condition $w' = C_2$ for $x = 0$ (the slope of the elastic curve at the free end of the column), it follows, considering $t(x=0) = -b \cdot \ln(1+0) = 0$ by (23):

and hence:

From the boundary condition $w''(x=0) = 0$, because $M(x=0) = 0$ (the bending moment at the free end of the column), it follows, considering $t(x=0) = 0$:

Successive derivating of v'' expresed from

$t=0$, upoštevajoč (29), (30) in (31) daje:

(25) for $t=0$ considering (29),(30) and (31), produces:

$$v_0''', v_0^{IV}, \dots, v_0^{(r)}, \dots$$

Nadalje uporabimo robni pogoj $w'(x=l)=0$.
Zaradi (23):

Further, the boundary condition $w'(x=l)=0$ has to be used. According to (23):

$$t(x=l) = t_1 = -b \cdot \ln\left(\frac{a+l}{a}\right) \quad (32).$$

Iz (1), za $x=0$ je:

$$\frac{a+l}{a} = \left(\frac{I_2}{I_1}\right)^{\frac{1}{n}} \quad (33),$$

kar vstavljeni v (32) daje:

which substituted into (32) gives:

$$t_1 = -b \cdot \ln \frac{I_2}{I_1} \quad (34).$$

Robni pogoj $w'(x=l)=0$ daje:

The boundary condition $w'(x=l)=0$ gives:

$$\left(\frac{dw}{dx}\right)_{x=l} = \left(\frac{dw}{dt}\right)_{t=t_1} \cdot \left(\frac{dt}{dx}\right)_{x=l} = 0 \quad (35)$$

ali, upoštevajoč (24) in (23),

or, considering (24) and (23):

$$(v)_{t=t_1} \cdot \left(-\frac{b}{a}\right) \cdot \frac{1}{1+\frac{a}{l}} = 0 \quad (36)$$

in zato:

and hence:

$$(v)_{t=t_1} = 0 \quad (37).$$

Če (37) izrazimo z (28), dobimo:

If (37) is expressed by (28), it follows that:

$$v_0 + \frac{t_1}{1!} v_0' + \frac{t_1^2}{2!} v_0'' + \dots + \frac{t_1^r}{r!} v_0^{(r)} + \dots = 0 \quad (38).$$

Izraz (38) vodi k enačbi $P(K_1, K_2) = 0$ (pomeni polinom), če količniki, s katerimi množimo odvode $v_0^{(r)}$ v (38), dajejo konvergentno vrsto.

The expression (38) leads to the equation $P(K_1, K_2) = 0$, (P denotes polynomial), if the coefficients multiplying the derivatives $v_0^{(r)}$ in (38) form a converging series.

Ovod $v_0^{(r)}$, dobljen kot v'' iz (25), odvajamo $(r-2)$ -krat zaporedno, dobi obliko:

The derivative $v_0^{(r)}$, obtained if v'' expressed from (25) is $(r-2)$ - times consecutively derived, takes the form:

$$\begin{aligned} v_0^{(r)} &= \frac{n-3}{b} v_0^{(r-1)} + \frac{n-2}{b^2} v_0^{(r-2)} - K_1 \left[v_0^{(r-2)} + \frac{(r-2) \cdot (n-p-3)}{1!} v_0^{(r-3)} + \dots \right. \\ &\quad \dots + \frac{(r-2)(r-3)\dots(r-i)}{(i-1)!} \left(\frac{n-p-3}{b} \right)^{i-1} v_0^{[r-(i+1)]} + \dots \\ &\quad \dots + \frac{(r-2)(r-3)\dots[r-(r-1)]}{(r-2)!} \left(\frac{n-p-3}{b} \right)^{r-2} v_0 \left. \right] + \\ &\quad + (K_1 - K_2) \left[v_0^{(r-2)} + \frac{(r-2) \cdot n-2}{1!} \cdot v_0^{(r-3)} + \dots \right. \\ &\quad \dots + \frac{(r-2)(r-3)\dots(r-i)}{(i-1)!} \left(\frac{n-2}{b} \right)^{i-1} v_0^{[r-(i+1)]} + \dots \\ &\quad \dots + \frac{(r-2)(r-3)\dots[r-(r-1)]}{(r-2)!} \left(\frac{n-2}{b} \right)^{r-2} v_0 \left. \right] \end{aligned} \quad (39).$$

Analiza izraza (39) kaže, da lahko (38) zapišemo v obliki:

The analysis of the expression (39) shows that (38) can be written in the form:

$$\sum_{i=1}^{\infty} \left(\sum_{r=0}^{\infty} c_{r,i} \frac{t_1^r}{r!} \right) \cdot (K_1^q K_2^s)_i = 0 \quad (40),$$

kjer je $c_{r,i}$ količnik, ki odvod $v_0^{(r)}$ v (38) množi z zmnožkom $(K_1^q K_2^s)_i$. (Tu je i povezan z določeno dvojico vrednosti eksponentov q in s). Raziskava konvergencije vrste:

$$\sum_{r=0}^{\infty} c_{r,i} \frac{t_1^r}{r!} \quad (41)$$

je pokazala, da je to hitro konvergentna vrsta, katere konvergentnost je hitrejša, če je I_2/I_1 manjši ter konvergenca obstaja za vsako razmerje I_2/I_1 in zato lahko izberemo $b = 1$. Upoštevajoč hitro konvergenco (41), lahko vsoto C_i aproksimiramo kot:

kjer je R dovolj visoka stopnja najvišjega odvoda $v_0^{(R)}$, izračunanega v (39). Prav tako se je izkazalo, če je R dovolj visoka, C_i množi zmnožek $(K_1^q K_2^s)_i$ z eksponentoma q in s , proti največjim vrednostim v odvodih $v_0^{(r)}$ do $v_0^{(R)}$, praktično izgine. Zaradi tega, ob zadosti visokem R , vrste (40) praktično preide v vrsto:

$$\sum_{i=0}^{i_{\max}} \left(\sum_{r=0}^R c_{r,i} \frac{t_1^r}{r!} \right) \cdot (K_1^q K_2^s)_i = 0 \quad (42),$$

ki ima, zaradi končnega števila členov, obliko polinoma $P(K_1, K_2)$ z vrednostjo nič. Oznaka i_{\max} v enačbi (42) pomeni dvojico eksponentov q in s v kombinaciji z največjimi vrednostmi v odvodih $v_0^{(r)}$ do $v_0^{(R)}$.

Enačba $P(K_1, K_2) = 0$ omogoča določitev kritične kombinacije podkritične teže F_G stebra in tlačne sile F'_{cr} ki povzroči uklon stebra določene geometrijske oblike. Zaradi (26), (27), (20), (21) in (1), upoštevajoč $b = 1$, dobimo:

$$K_1 = \frac{F_G}{EI_2} \cdot \frac{I_2}{I_1} \cdot \frac{a^2}{\left(\frac{I_2}{I_1} \right)^{\frac{p+1}{n}} - 1} \quad (44),$$

$$K_2 = \frac{F}{EI_2} \cdot \frac{I_2}{I_1} \cdot a^2 \quad (45).$$

Veličino a^2 lahko spremenimo, upoštevaje (1) v:

where $c_{r,i}$ is the coefficient which in the derivative $v_0^{(r)}$, appearing in (38), multiplies the product $(K_1^q K_2^s)_i$. (Here i is connected with a particular couple of the values of the exponents q and s .) The investigation of the convergence of the series:

showed that this was a rapidly converging series, with a convergence more rapid as I_2/I_1 becomes smaller and that a rapid convergence existed for any ratio I_2/I_1 . The convergence does not depend upon the arbitrary constant b introduced in (23) and thus its value can be chosen as $b = 1$. Considering the rapid convergence of (41) its sum C_i can be approximated as follows:

where R is a sufficiently high order of the highest derivative $v_0^{(R)}$ calculated in (39). Further, it is clear that if R is sufficiently high, C_i multiplying products $(K_1^q K_2^s)_i$ with exponents q and s tending to the maximum values appearing in derivatives $v_0^{(r)}$ ending by $v_0^{(R)}$, practically vanishes. Considering this, with a sufficiently high R , series (40) is practically equal to the series:

$$\sum_{i=0}^{i_{\max}} \left(\sum_{r=0}^R c_{r,i} \frac{t_1^r}{r!} \right) \cdot (K_1^q K_2^s)_i = 0 \quad (43),$$

which, due to a finite number of terms, has the form of a polynomial $P(K_1, K_2)$ equal to zero. The mark i_{\max} appearing in (43) denotes a couple of exponents q and s in a combination of their maximum values appearing in derivatives $v_0^{(r)}$ ending by $v_0^{(R)}$.

The equation $P(K_1, K_2) = 0$ makes it possible to determine the critical combination of the subcritical weight F_G of the column and the compressive force F'_{cr} which will cause buckling of a column with a particular geometry. According to (26),(27),(20),(21) and (1), considering $b = 1$ it follows that:

The quantity a^2 can be transformed, considering (1):

$$a^2 = \frac{a^2}{l^2} \cdot l^2 = \frac{l^2}{\left(\frac{a+l}{a} - 1 \right)^2} = \frac{l^2}{\left[\left(\frac{I_2}{I_1} \right)^{\frac{1}{n}} - 1 \right]^2} \quad (46).$$

Vstavitev (46) v (44) in (45) daje:

Substituting (46) into (44) and (45) gives:

$$K_1 = \frac{F_G l^2}{EI_2} \cdot \frac{\frac{I_2}{I_1}}{\left[\left(\frac{I_2}{I_1} \right)^{\frac{1}{n}} - 1 \right]^2} \cdot \frac{1}{\left(\frac{I_2}{I_1} \right)^{\frac{p+1}{n}} - 1} \quad (47)$$

$$K_2 = \frac{Fl^2}{EI_2} \cdot \frac{\frac{I_2}{I_1}}{\left[\left(\frac{I_2}{I_1} \right)^{\frac{1}{n}} - 1 \right]^2} \quad (48).$$

Videli smo, da K_1 in K_2 vsebujeta $F_G F, I_2/I_1$ in eksponenta n in p , ter zato enačba $P(K_1, K_2) = 0$ kakor je bilo povedano, omogoča določitev kombinacije F_G in F'_{cr} , ki povzroča uklon stebra znane geometrijske oblike.

Določitev kritične kombinacije $(F_G + F)_{cr}$ je bila izvedena kakor sledi. Najprej za $F = 0$ je enačba $P(K_1, K_2) = 0$ spremenjena v $P(K_1) = 0$. Iz najmanjšega korena K_{10} te enačbe, je določena kritična teža F_{Gcr} stebra, brez dodatne vzdolžne tlačne sile F , z uporabo enačbe (47).

Nato je za različna razmerja F_G/F_{Gcr} , ki določajo vrednost F_G in tako tudi vrednost K_1 , enačba $P(K_1, K_2) = 0$ spremenjena v posebno enačbo $P(K_2) = 0$.

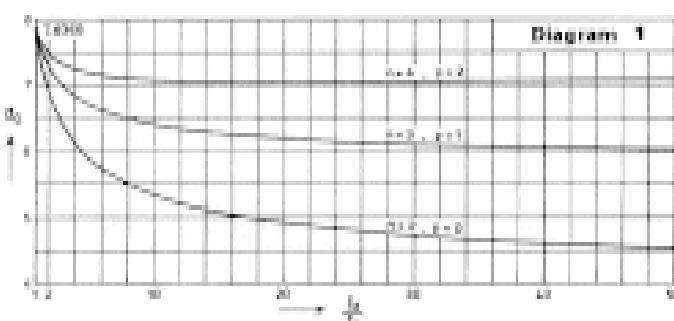
Iz najmanjšega korena K_{20} teh enačb, so bile kritične sile F'_{cr} , ki skupaj z dano F_G povzročajo uklon, določene z enačbo (48). Na ta način, za $F_G = 0$, je bila določena F'_{cr0} kot kritična tlačna sila, ki deluje v stebru zanemarljive teže.

Vrednosti F_{Gcr} , F_{cr0} in F'_{cr} so bile ovrednotene za naslednje stebre z geometrijskimi oblikami, ki jih določata n in p :

1. $n = 4, p = 2$ (steber v obliki prisekanega stožca ali piramide oz. votlega prisekanega stožca ali piramide);
2. $n = 3, p = 1$ (to se nanaša na steber nespremenljive debeline in linearno odvisne širine prereza oziroma približno na steber v obliki stožčaste cevi nespremenljive debeline stene);
3. $n = 2, p = 0$ (to se približno nanaša na steber, zgrajen iz štirih palic nespremenljivega prereza, postavljenih vzdolž robov navidezne prisekane piramide, združenih z mrežno polnitvijo zanemarljive teže).

Veličina d_G je narisana v odvisnosti od razmerja I_2/I_1 (sl.1) ter za omenjene vrednosti n in p v diagramu 1. Kritična lastna teža stebra F_{Gcr} je povezana z d_G kot:

$$F_{Gcr} = d_G \frac{EI_2}{l^2} \quad (49).$$



We can see that K_1 and K_2 contain $F_G F, I_2/I_1$ and exponents n and p , and thus the equation $P(K_1, K_2) = 0$, as was mentioned above, makes possible the determination of the combination of F_G and F'_{cr} causing the buckling of a column of a particular geometry.

The determination of the critical combination $(F_G + F)_{cr}$ was carried out as follows. First, for $F = 0$ the equation $P(K_1, K_2) = 0$ transformed to $P(K_1) = 0$. From the smallest root K_{10} of this equation the critical weight F_{Gcr} of the column, which had not been loaded by the axial compressive force F , was determined with (47).

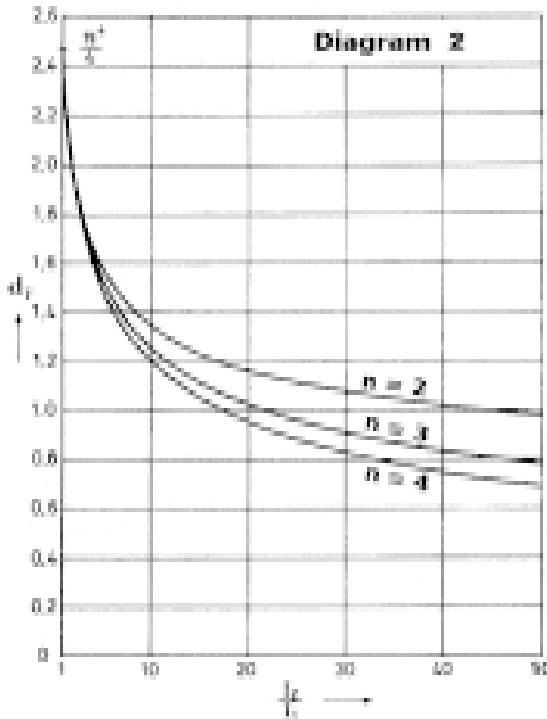
Then, for several ratios F_G/F_{Gcr} , which determined the value of F_G and thus the value of K_1 , the equation $P(K_1, K_2) = 0$ transformed to particular equations $P(K_2) = 0$.

From the smallest root K_{20} of these equations the critical forces F'_{cr} which, in combination with the given F_G would cause buckling, were determined through (48). In this way, for $F_G = 0, F_{cr0}$ was determined as the critical compressive force acting on the column of negligible weight.

The values of F_{Gcr}, F_{cr0} and F'_{cr} were determined for the following columns with geometries defined by n and p :

1. $n = 4, p = 2$ (the column in the form of a truncated cone or pyramid resp. hollow truncated cone or pyramid);
2. $n = 3, p = 1$ (this is referring to the column with a constant width and linearly varying height of the cross-section or approximately to the column in the form of a conical tube of constant wall thickness);
3. $n = 2, p = 0$ (this is approximately referring to the column constructed from four rods of constant cross-section laid along the edges of a virtual truncated pyramid connected by the lattice filling of negligible weight).

The quantity d_G plotted as a function of the ratio I_2/I_1 (Fig.1) and for the values of n and p as mentioned above is shown in Diagram 1. The critical intrinsic weight of the column F_{Gcr} is expressed by d_G as follows:



Veličina d_F je narisana v odvisnosti od razmerja I_2/I_1 ter za omenjene vrednosti n v diagramu 2. Kritična sila F_{cr0} , ki deluje na steber zanemarljive teže, je povezana z d_F kot:

The quantity d_F plotted as a function of the ratio I_2/I_1 and for the values of n mentioned above is shown in Diagram 2. The critical force F_{cr0} acting on the column of negligible weight is expressed by d_F as follows:

$$F_{cr0} = d_F \frac{EI_2}{l^2} \quad (50).$$

3 PRIMERJAVA S PRIBLIŽNO REŠITVIVO

Približna rešitev problema s predpostavljenim linearno povezanostjo teže stebra in vzdolžne tlačne sile F je prikazana na sliki 2 z Dunkelreyeve premico (črtkana črta)

$$\frac{F'_{crD}}{F_{cr0}} + \frac{F_G}{F_{Gcr}} = 1 \quad (51),$$

kjer je F'_{crD} vzdolžna tlačna sila, ki bi skupaj s podkritično tezo stebra F_G , povzročila uklon. Po postopku, ki je opisan v tem prispevku, so bile za ista razmerja F_G/F_{Gcr} dobljene večje vrednosti F'_{cr} . Te vrednosti so podane kot krivulja na sliki 2, ki se razlikuje od Dunkelreyeve premice za razliko Δ . Zato lahko zapišemo

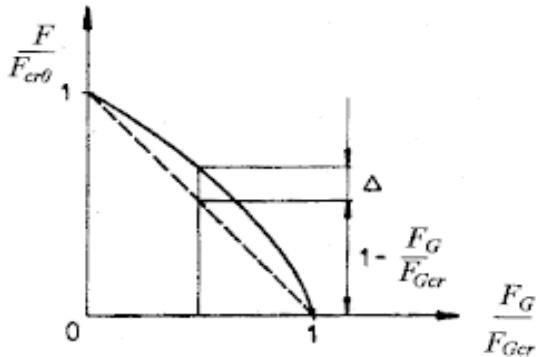
$$\frac{F'_{cr}}{F_{cr0}} + \frac{F_G}{F_{Gcr}} = 1 + \Delta \quad (52).$$

Razmerje:

The ratio:

$$f = \frac{\Delta}{F'_{crD}/F_{cr0}} = \frac{F'_{cr}/F_{cr0}}{1 - F_G/F_{Gcr}} - 1 \quad (53),$$

The approximate solution to the problem assuming a linear interaction of the weight of the column and the axial compressive force F , is shown in Fig.2 by Dunkelrey's straight line (dashed line) where F'_{crD} is the axial compressive force that would, in a linear interaction with a subcritical weight F_G of the column, cause buckling. With the procedure described in this paper for the same ratio F_G/F_{Gcr} larger values of F'_{cr} have been determined. These values are shown by the curve in Fig.2. This curve differs from Dunkelrey's line by a difference Δ . Thus it can be written that:



Sl.2. Povezanost teže stebra in vzdolžne tlačne sile

Fig. 2 Interaction of the weight of the column and the axial compressive force

ki ga izberemo kot merilo razlike med F'_{cr} in F'_{crD} , narašča za večja razmerja I_2/I_1 in F_G/F_{Gcr} ter večje vrednosti eksponentov n in p . Največje vrednosti f presegajo 1,3 (tj. F'_{cr} prek 30 odstotkov nad F'_{crD}).

Toda, če upoštevamo razmerje kritične obremenitve $(F+F'_cr)$, kakor ga daje rešitev ravnovesne enačbe, opisane v tem prispevku, ter celotna kritična obremenitev $(F+F'_crD)$ približne rešitve, je največja vrednost razmerja pod 1,02, tj. celotna dejanska kritična obremenitev se od približne rešitve razlikuje le za +2 odstotka. Vzrok za tako majhno razliko je v dejstvu, da je F_{Gcr} 3 do 10-krat večja od F_{cr0} , tako da je vpliv večje dejanske kritične sile F'_{cr} zanemarljiv v primerjavi z veliko večjo vrednostjo F_G , tembolj ker največja različnost med F'_{crD} in F'_{cr} nastaja v območju velikih razmerij F_G/F_{Gcr} , ko je vrednost F_G veliko večja od vrednosti F'_{cr} .

4 SKLEP

To poročilo ugotavlja, da približna rešitev, ki predpostavlja linearno povezanost teže stebra in vzdolžne tlačne sile, daje celotno kritično obremenitev $(F_G+F)_{crD}$, ki se razlikuje od dejanske celotne kritične sile $(F_G+F)_{cr}$ znotraj -2 odstotka in zato približna rešitev ponuja rezultate velike natančnosti in na varni strani. Zato je povečevalni količnik:

$$\alpha = \frac{1}{1 - \frac{(F_G + F)}{(F_G + F)_{cr}}} \quad (54)$$

zelo dobro približno podan z [6]:

$$\alpha = \frac{1}{1 - \frac{(F_G + F)}{(F_G + F)_{crD}}} \quad (55),$$

kjer je:

$$(F_G + F)_{crD} = \left(1 + \frac{F}{F_G}\right) \frac{F_{Gcr} + F_{cr0}}{\frac{F}{F_G} F_{Gcr} + F_{cr0}} \quad (56).$$

where:

$$(F_G + F)_{cr} = \left(1 + \frac{F}{F_G}\right) \frac{F_{Gcr} + F_{cr0}}{\frac{F}{F_G} F_{Gcr} + F_{cr0}} \quad (56).$$

which has been taken as a measure of differing F'_{cr} from F'_{crD} was growing as the ratio I_2/I_1 and F_G/F_{Gcr} were larger and the exponents n and p were larger. The highest values of f are over 1.3 (i.e., F'_{cr} over 30 % more than F'_{crD}).

But if the ratio of the total critical load $(F+F'_cr)_{cr}$ determined by the solution to the equilibrium equation described in this paper to the total critical load $(F+F'_crD)_{crD}$ using the approximate solution is considered, a maximum obtained value of this ratio extends under 1.02, i.e., the total real critical load differs from the one obtained by the approximate solution by less than +2 %. The reason for such a small difference is the fact that F_{Gcr} is 3 to 10 times bigger than F_{cr0} , and so the influence of the larger real critical force F'_{cr} vanishes in the addition to the much larger value of F'_cr the more so as the largest differing of F'_{crD} from F'_{cr} takes place in the area of the big ratio F_G/F_{Gcr} when the value of F_G is much larger than the value of F'_{cr} .

4 CONCLUSION

This paper establishes that the approximate solution, assuming a linear interaction of the weight of the column and the axial compressive force, gives the total critical load $(F_G+F)_{crD}$ which differs from the real total critical load $(F_G+F)_{cr}$ within -2 % and therefore the approximate solution offers great accuracy and is on the side of safety. Thus the amplification factor:

can be very well approximated by [6]:

Tu je F/F_G dejansko razmerje delajoče obremenitve v razmerju s težo antenskega stebra. Vrednosti F_{Gcr} in F_{cr0} lahko določimo po (49) in (50).

Here F/F_G is the real ratio of the effective load to the weight of the antenna column. The values of F_{Gcr} and F_{cr0} can be determined by (49) and (50).

5 LITERATURA 5 REFERENCES

- [1] Bažant, Z.P., L. Cedolin (1991) Stability of structures. *Oxford University Press*, New York.
- [2] Chen, W.T., E.M. Lui (1987) Structural stability. *Elsevier*, New York/Amsterdam/London.
- [3] Falk, S. (1974) Knicken gerader Stäbe unter Eigengewicht. *Ing.Archiv*, 43:110-117.
- [4] Gere, M., W. Carter (1962) Critical buckling load for tapered columns. *Proc. ASCE, J.Struct. Div.*, 88:1-11.
- [5] Glück, J. (1973) The buckling load of an elastically supported cantilevered column with continuously varying cross section and distributed axial load. *Ing.Archiv*, 42:355-359.
- [6] Petersen, C. (1982) Statik und Stabilität der Baukonstruktionen. *F. Vieweg und Sohn*, Braunschweig.
- [7] Timoshenko, S.P., J.M. Gere (1961) Theory of elastic stability. *McGraw-Hill*, New York.

Naslova avtorjev: dr. Juraj Saucha
Fakulteta za strojništvo
in pomorstvo
I. Lučića 5
10000 Zagreb, Hrvatska

dr. Jerko Radoš
dr. Čedomir Ivaković
Fakulteta za promet in
prometno tehniko
Vukelićeva 4
10000 Zagreb, Hrvatska

Authors' Addresses: Dr. Juraj Saucha
Faculty of Mechanical Eng.
and Naval Architecture
I. Lučića 5
10000 Zagreb, Croatia

Dr. Jerko Radoš
Dr. Čedomir Ivaković
Faculty of Transport and
Traffic Engineering
Vukelićeva 4
10000 Zagreb, Croatia

Prejeto:
Received: 6.4.2000

Sprejeto:
Accepted: 12.4.2001

Ocenjevanje zahtevnosti postopkov

An Evaluation of Process Complexity

Romana Vajde Horvat - Tatjana Welzer Družovec - Ivan Rozman - Mirko Soković

Postopke v vseh aktivnostih lahko opredelimo z zaporedjem aktivnosti, ki se izvajajo, delovnimi proizvodi, ki so potrebni za izvajanje aktivnosti, oziroma nastanejo kot rezultat aktivnosti ter z viri, ki so potrebni za izvedbo posameznih aktivnosti. Čim bolj podrobno poznamo postopek, tem več podatkov je na voljo pri ocenjevanju posameznih projektov. V prispevku je opisan model SoPCoM (Software Process Complexity Model), ki omogoča izdelavo podrobnega opisa procesa na temelju notacije Petrijevih mrež. Model postavlja tudi mehanizem za ocenjevanje zahtevnosti tako posameznih gradnikov kakor tudi postopka kot celote. Na podlagi tako izvedenih ocenitev lahko določimo relativni delež truda, ki bo v izbranem projektu potreben za izvedbo posamezne aktivnosti. Model SoPCoM je bil razvit v okviru raziskovalnega dela na Univerzi v Mariboru.

© 2001 Strojniški vestnik. Vse pravice pridržane.

(Ključne besede: postopki, modeli postopkovni, zahtevnost postopkov, mreže Petri)

All types of processes can be described as a sequence of activities using a set of required input and output products and resources of different types. Knowing the process in detail ensures that evaluations of the required effort for projects — conducted on the basis of a described process model — are more accurate. The Software Process Complexity Model (SoPCoM) described in this paper provides a mechanism for the description of a process in Petri-nets notation. Attributes defined in the SoPCoM enable an evaluation of the complexity of each process element as well as the complexity of the process as a whole. The relative complexity of each activity is a basis for an evaluation of the effort of individual projects, conducted according to the process model. The SoPCoM was developed at the University of Maribor.

© 2001 Journal of Mechanical Engineering. All rights reserved.

(Keywords: processes, process model, process complexity, Petri nets)

0 UVOD

Proizvodni postopki, zlasti tisti, ki temeljijo na serijski proizvodnji, so v praksi že dolgo izpostavljeni zahtevam po natančnem modeliranju in določanju. Na drugi strani se srečujemo s postopki, ki omogočajo več ustvarjalnosti in svobode pri delu (npr. načrtovanje proizvodnje, načrtovanje projektov, različni nadzorni postopki, storitveni in podporni postopki v podjetju) in jih je hkrati tudi teže natančno določiti. Kljub temu zaradi različnih vzrokov (prenova postopkov, priprave podjetij na overjanje sistemov kakovosti in podobno) podjetja v vse večji meri v smiselnih mejah modelirajo in določajo tudi tovrstne postopke.

Modeli postopkov, ki nastanejo, so v prvi vrsti namenjeni kot natančno navodilo za delo. Zaposleni tako natančno poznajo delovni postopek, ki ga morajo pri svojem delu izvesti. Vendar to ni edina možna uporabna vrednost postopkovnih modelov. So namreč tudi dragocen vir podatkov za vsebino in

0 INTRODUCTION

The strict modelling and definition of production processes, especially those based on serial production, is common in practice. Other types of processes, like processes for production planning and project planning, different control processes, service processes and other support processes, are usually more creative and innovative and therefore it is more difficult to define them in detail. Nevertheless, different motives like process reengineering and quality-management-system establishment also force organizations to model and define this type of process.

Process models are most commonly used as a guideline and as instructions for employees. Through the process model the process can be visualised in detail. Process models, therefore, are the source of knowledge about the content and the sequence of activities that have to be performed

zaporedje aktivnosti, ki jih je treba izvesti, o delovnih proizvodih, ki se pri tem uporabijo in morajo pri tem nastati, ter o virih, ki so potrebni za izvedbo posameznih aktivnosti. Te podatke lahko med drugim uporabimo pri načrtovanju posameznih projektov oziroma pri ocenjevanju potrebnega truda za izvajanje posameznih nalog pri projektih. Na kakšen način?

Postopkovni model določa vse aktivnosti, delovne proizvode in vire (ljudi, opremo, prostore ipd.) v procesu. Za vsakega izmed teh elementov lahko ocenimo, kako zahteven je: kako zahteven za izdelavo je posamezen delovni proizvod, kakšna je zahtevnost za vire, ki jih potrebujemo. Število in zahtevnost delovnih proizvodov, ki so uporabljeni oz. izdelani v okviru posamezne aktivnosti, vpliva na zahtevnost te aktivnosti.

Če upoštevamo to znanje o postopku in če uporabimo ustrezno formalno podporo, lahko opravimo potrebne izračune. V nadaljevanju bomo podrobnejše predstavili model SoPCoM (Software Process Complexity Model), ki tovrstne izračune omogoča.

1 PREDSTAVITEV PODROČJA MODELIRANJA POSTOPKOV

Osnovni pojmi, ki jih srečujemo pri modeliranju postopkov, so naslednji:

1. Postopek je skupina med seboj povezanih korakov/aktivnosti, ki vodijo k zadanemu cilju, in vseh elementov za njihovo izvajanje.
2. Aktivnost je najmanjša akcija v postopku, za katero navzven ne prikazujemo njene strukture. Pogosto se pojmom aktivnost enači še s pojmomom naloga in postopkovni korak.
3. Viri so ljudje ali drugi "izvajalci" posameznih aktivnosti. Drugi izvajalci so predvsem različna orodja in oprema. Vire torej delimo na:
 - vloge, s katerimi so opisane odgovornosti in pravice človeških virov ter njihova usposobljenost, ki je potrebna za izvedbo določene aktivnosti v postopku;
 - programsko opremo, ki jo sestavljajo računalniški programi oz. programska orodja, ki podpirajo ali avtomatizirajo določen segment dela, ki ga je treba opraviti v okviru aktivnosti;
 - strojno opremo, ki vključuje stroje, orodja, delovne postaje, strežnike, tiskalnike in drugo strojno opremo, na kateri poteka izvajanje postopka;
 - infrastrukturo, kamor spadajo prostori, pisarniška, logistična, komunikacijska in druga oprema, ki je pomembna za razvoj proizvoda. Infrastrukturo v postopkovnem modelu modeliramo takrat, kadar so zanjo podane specifične zahteve glede dostopnosti ali specialne opreme, vključene v razvojni postopek.
4. Delovni proizvod je izdelek, ki se uporablja znotraj postopka. Delovni proizvodi so lahko tako različni dokumenti, ki nastanejo pri izvajanjtu aktivnosti, različni načrti kakor tudi drugi tehnični izdelki, ki

within activities; about work products (artifacts) which are used and/or generated within the process; and about resources needed to perform these activities. This kind of knowledge can also be used for project planning and the evaluation of the required effort for specific activities within the process. How can this be done?

The process model specifies all activities, resources and artifacts. For each of these elements its complexity can be evaluated. It is possible to evaluate how complex it is to develop a specific work product and how complex are the resources involved in the development process. The number and the complexity of the work products and the resources which are used within an activity influence on the complexity of the activity itself.

Considering this predisposition and using an appropriate formal support, the complexity of a process can be evaluated. The model for such an evaluation, the SoPCoM (Software Process Complexity Model), will be described later in this paper.

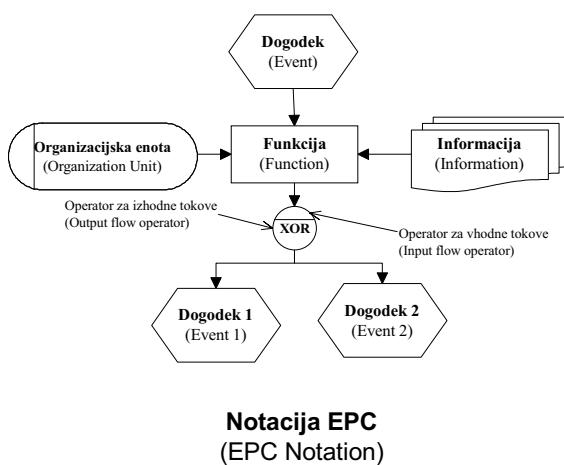
1 AN INTRODUCTION TO PROCESS MODELLING

To understand the model which is presented later in the paper, some basic terms need to be defined:

1. Process - a group of interrelated steps/activities, leading to a common goal; and all of the elements necessary for their execution.
2. Activity - the smallest (atomic) action of the process. Its structure is not visible to the outside. The terms task and process step are also often used to refer to the atomic actions of the process.
3. Resources - employees and facilities needed to perform the specified activity. Types of resources are:
 - Roles - human resources, together with their responsibilities and authorities.
 - Software - includes software applications and tools, supporting or automating any segment of the activity.
 - Hardware - includes workstations, servers, printers and other hardware needed within the software process.
 - Infrastructure - includes offices, office equipment as well as logistic, communication and other accessories needed for software development. Infrastructure is modeled only when special requirements (for example, accessibility, special equipment) are required.
4. Artifact - a product which is used/produced within the process. Examples of artifacts: documents created as a result of activities, plans, diagrams, and other technical products generated

- nastajajo pri izvajanju določene aktivnosti in se uporabljajo kot vhodi v naslednje aktivnosti.
5. Postopkovni model je predstavitev določenega postopka v izbrani notaciji. V organizaciji ga lahko uporabimo kot predlogo za izvajanje dejanskih postopkov.

Naštete gradnike postopka je treba v podjetju predstaviti jasno in razumljivo. Natančnost modeliranja je odvisna od namena uporabe tako predstavljenega postopkovnega modela. Za grobo modeliranje so tako v praksi najpogosteje uporabljeni metode ETVX (Entry, Task, Verification and Exit), EPC (Event Process Chain) and IDEF (Integrated Definition Language). Slednji prikazuje sliko 1. Za natančnejše modeliranje postopkov uporabljamo različne metode, ki lahko temeljijo na predstavitvi stanj (avtomati stanj, Petrijeve mreže, formalne slovnice), na podlagi pravil in na podlagi ukazov ([1] in [2]).



Sl. 1. Notaciji EPC in IDEF
Fig. 1. EPC and IDEF notations

2 MODELIRANJE POSTOPKOV IN VISOKONIVOJSKE OBARVANE PETRIJEVE MREŽE

Že v uvodu smo omenili, da model SoPCoM temelji na notaciji visokonivojskih obarvanih Petrijevih mrež (OPM - CPN). V nadaljevanju podajamo kratko predstavitev te notacije in primer njene uporabe za modeliranje postopkov.

2.1 Petrijeve mreže

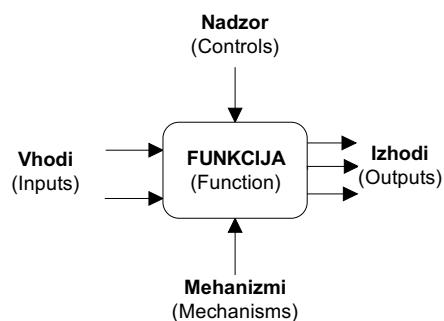
Teorija Petrijevih mrež (PM) ima svoj začetek že v šestdesetih letih in je od takrat doživela velik razmah in vrsto razširitev. Matematična predstavitev Petrijevih mrež je dograjena s preprosto grafično predstavljivijo. Prav zaradi tega so tako pogosto uporabljeni pri modeliranju postopkov. Zaradi dobre matematične zasnove so Petrijeve mreže primerno orodje tudi za analizo postopkovnih modelov. Osnovni elementi Petrijevih mrež so:

- prehodi, s katerimi predstavimo aktivnosti znotraj postopka (predstavitev: pravokotnik);

by activities and used as inputs for the next activity.

5. Process model - a presentation of a specified process. Can be used as a template for the implementation of the real process.

All elements should be presented in a clear and understandable way. The precision of the modelling depends on the reason for using the process model. For conceptual modelling, techniques like ETVX (Entry, Task, Verification and Exit), EPC (Event Process Chain) and IDEF (Integrated Definition Language) are most often used in practice. Figure 1 presents the EPC and IDEF notations. For more detailed modelling, different methods can be used, based on state-representation-(state automates, Petri nets, formal grammars), rule- and imperative-based paradigms ([1] and [2]).



2 PROCESS MODELLING AND HIGH-LEVEL COLORED PETRI NETS

The SoPCoM (Software Complexity Process Model) is based on the notation of high-level colored Petri nets. In this section the basics of Petri-nets notation are presented.

2.1 Petri nets

Theory of Petri nets was developed in the sixties, since when it has been upgraded and enhanced in many ways. The mathematical representation of Petri nets is enhanced with a graphical representation which makes it much more understandable and more appropriate for process modelling and the further analysis of process models. The basic elements of Petri nets are:

- transitions – can be used for the presentation of activities performed within the process (presentation: rectangle);

- žetoni, ki jih uporabimo za predstavitev posameznih delovnih proizvodov in virov, ki potujejo skozi postopkovni model, (predstavitev: polni krožci);
- mesta, ki predstavljajo začasno shrambo žetonov. Žetoni na mestih čakajo, da bodo ustrezno obdelani v naslednji aktivnosti, (predstavitev: krog);
- povezave, s katerimi prikažemo mogoče poti po postopkovnem modelu (predstavitev: puščice).

Z različnimi utežmi in tipi (barvami) naštetih elementov lahko predstavimo dejansko dogajanje v postopkovnem modelu. Več o Petrijevih mrežah lahko bralec najde v našeti literaturi [2] do [5]. Slika 2 prikazuje primer postopkovnega modela, predstavljenega v notaciji Petrijevih mrež.

2.2 Primer modeliranja postopka – postopek testiranja pri razvoju programske opreme

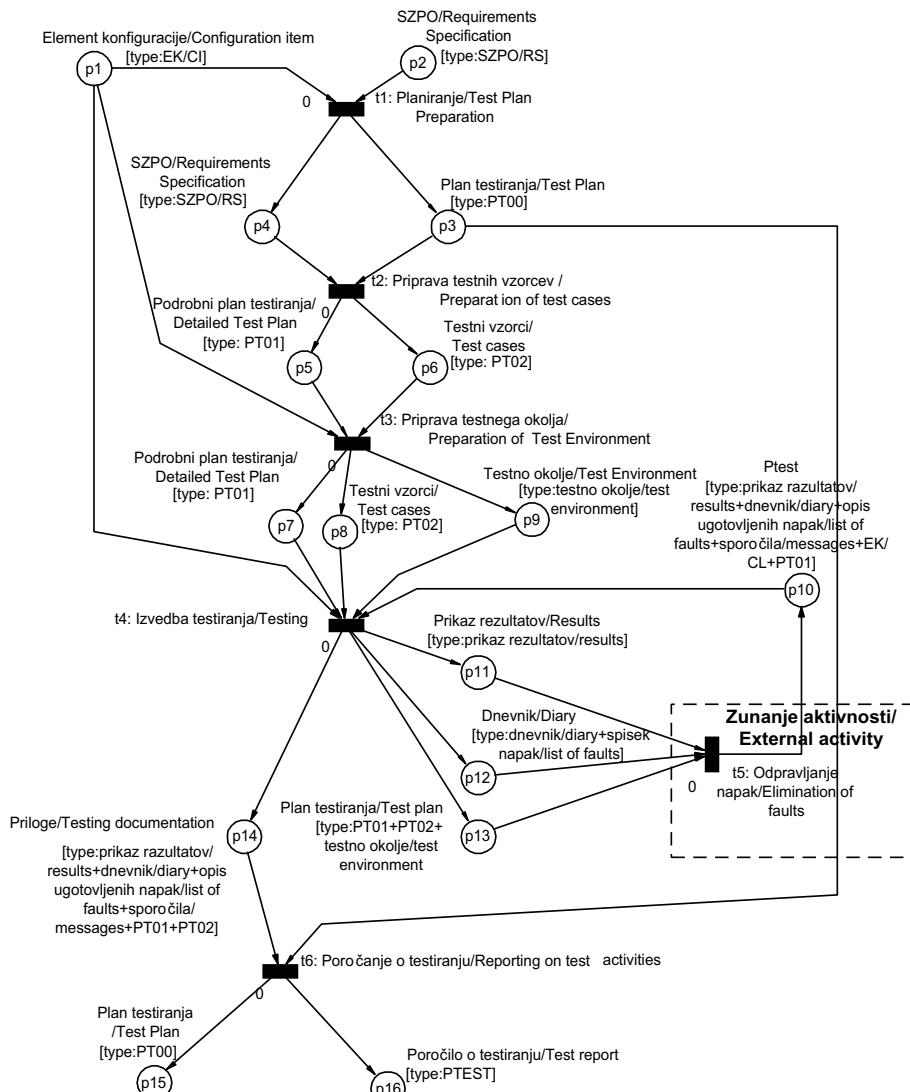
Kot tipičen primer storitvenega postopka, pri katerem se srečujemo z veliko stopnjo individualnega dela, inovativnosti in ustvarjalnosti

- tokens – can be used to represent the artifacts and resources needed to perform the activity or produced by the activity; (presentation: small tokens)
- places – represent the temporary store for tokens. Tokens wait at places to be processed in the next activity (presentation: circle)
- arcs – represent the path of tokens between places and transitions. (presentation: arcs).

By adding different weights to these elements and by the introduction of different types (colors) of these elements, the process model can be described in detail. More about Petri nets can be found in [2] to [5]. Figure 2 shows an example of a process model represented in Petri-nets notation.

2.2 An example of a process model – Testing a process within software development

The software development process is a typical process with a high level of individualism, creativity and innovation. Consequently, it allows



Sl. 2. Postopek testiranja, predstavljen z notacijo visokonivojskih obarvanih Petrijevih mrež

Fig. 2. The testing process, represented in high-level colored Petri net notation

ter z omejenimi možnostmi predpisovanja omejitev pri izvajanju posameznih aktivnosti, lahko obravnavamo tudi postopek razvoja programske opreme. Osnovna težava pri modeliranju tovrstnih postopkov je premajhno poznavanje obsega dela, potrebnega za razvoj posameznih komponent, saj pri razvoju programske opreme dejansko načrtujemo neki proizvod (programska oprema) in ga enkrat samkrat izdelamo. Iz tega lahko v veliki meri povlečemo vzporednice z razvojnimi postopki v proizvodnih postopkih, le da se pri programski opremi postopek po izdelavi enega proizvoda konča, medtem ko se v proizvodnih podjetjih v tej fazi običajno začne serijska proizvodnja.

Na primeru postopka testiranja pri razvoju programske opreme si poglejmo, kako je mogoče spremeniti predstavitev postopkov iz notacij EPC ali IDEF v notacijo visokonivojskih Petrijevih mrež (sl. 2).

Aktivnosti predstavimo s prehodi. Ker se lahko posamezna aktivnost izvede na več načinov (uporablja lahko različne vhode oz. ustvarja različne izhode glede na razmere v času izvajanja aktivnosti), te različne načine poimenujemo kot različne "barve aktivnosti".

Delovne proizvode, ki vstopajo v oziroma zapuščajo posamezno aktivnost, lahko modeliramo z žetoni, ki po povezavah vstopajo/zapuščajo prehod. Število teh žetonov, ki so potrebni na vhodu/izhodu krmilimo z utežmi povezav. Posamezen tip delovnega proizvoda (npr. poročilo o testiranju), predstavimo z različnimi barvami žetonov. V postopkovnem modelu dobimo torej toliko barv žetonov, kolikor je število različnih delovnih proizvodov. S tem, ko žeton določene barve postavimo na izbrano mesto, ponazorimo, da je delovni proizvod tega tipa nastal in je pripravljen za nadaljnjo obdelavo v naslednjem prehodu.

Preostale vire lahko predstavimo enako kot delovne proizvode. V nadaljevanju bomo obravnavali samo modeliranje delovnih proizvodov, ki je v praksi tudi najpogosteje, saj bo model SoPCoM tako laže razumljiv.

3 IZRAČUN ZAHTEVNOSTI MODELA POSTOPKA

Na zahtevnost modela vplivajo število in zahtevnost delovnih proizvodov in virov, ki so vključeni v postopek, ter število in zahtevnost vseh aktivnosti, ki jih v okviru postopka izvajamo.

Zgornja predpostavka zveni precej preprosto, vendar je pri izračunih treba natančno upoštevati vlogo, ki jo imajo posamezni delovni proizvodi pri posameznih aktivnostih. Izračun zahtevnosti poteka v desetih korakih, ki so predstavljeni v nadaljevanju.

3.1 Določitev vseh tipov delovnih proizvodov

Pripravimo seznam delovnih proizvodov (če modeliramo tudi vire, pripravimo tudi seznam virov). Predstavimo jih kot barve žetonov.

only limited possibilities for prescribing the boundaries for activity-implementation restrictions. The basic problem in modelling such processes is that each piece of software is actually a specific product and it is hard to predict in detail which components should be developed and what are the detailed requirements for these components. The software development process is therefore similar to the development of new products in other areas, but in the case of software the "production phase", which should succeed the development phase, does not exist.

The testing process in software development is also the example used to show the translation of EPC and IDEF presentations of the process model to Petri net notation. Figure 2 shows the example.

Activities are presented as transitions. Since each activity can be performed in different ways (using different inputs or producing different outputs depending on some conditions within the activity) these methods of activity implementation are represented as different colors of transitions.

Input/Output artifacts for an activity are modelled as tokens, which enter/leave the activity. The number of required input/output tokens is presented as the weight of a specific arc. Each type of artifact (e.g. Test Report) is presented as the color of token. In a process model we have as many tokens as we have different artifacts in a process model. A token assigned to a specific place was processed by a previous activity and is ready to be processed by the next activity (transition).

Other resources can be presented in the same way as artifacts. In practice, normally only the artifacts are modelled, and to make the SoPCoM more understandable, only the artifacts are modelled.

3 COMPUTATION OF PROCESS MODEL COMPLEXITY

The complexity of the process model depends on the number and the complexity of the artifacts and resources, as well as on the number and the complexity of the activities within the process.

It looks rather simple, but to evaluate the complexity, the roles of specific elements in the process model should be considered. The evaluation is performed in ten steps, described in the following pages.

3.1 Definition of artifacts and resources

The list of artifacts (and resources) is prepared and presented as the colors of tokens.

$\mathbf{C}_p = [\text{SZPO}, \text{EK}, \text{PT00}, \text{PT01}, \text{PT02}, \text{testno okolje}, \text{pričak rezultatov, opis ugotovljenih napak, sporočila, dnevnik, PTEST}]^T$

Za vrednotenje zahtevnosti delovnih proizvodov, vlog, infrastrukture, programske opreme in strojne opreme, moramo uporabiti različne atributte. Definiramo več skupin (razredov) elementov in za vsako skupino (razred) je veljaven drug nabor atributov.

Seznam razredov zapišemo kot:

$$\mathbf{G}_p = [g_{p1}, \dots, g_{pn_p}, \dots, g_{pn_{p_g}}]^T$$

V primeru modeliranja več skupin je treba podati tudi pripadnost posameznih barv k določenemu razredu (na primer: barva opisa ugotovljenih napak pripada razredu delovnih proizvodov, barva vodje projekta spada v razred vloge ipd.). Seznam razredov zapišemo v vektorju \mathbf{G}_p , ki ima dimenzijo enako številu različnih razredov barv žetonov, ki jih pri modeliranju upoštevamo. Pripadnost posamezne barve k določeni skupini podamo s funkcijo d in shranimo v vektorju \mathbf{D}_p :

$$d : \mathbf{C}_p \rightarrow \mathbf{G}_p$$

$$\mathbf{D}_p = [d(c_{p1}), \dots, d(c_{pn_p}), \dots, d(c_{pn_{p_g}})]^T$$

3.2 Ocenjevanje zahtevnosti posameznih delovnih proizvodov in virov

Vsak delovni proizvod ocenimo na podlagi definiranih atributov, ocenjeno vrednost pa shranimo v vektor:

$$\mathbf{x}_{c_p s} = [x_{c_p 1s}, \dots, x_{c_p js}, \dots, x_{c_p n_p s}]^T$$

Preglednica 1 prikazuje seznam atributov za vse prej naštete razrede elementov. Za vsak atribut je določena tudi pripadajoča merska lestvica. Preglednica 2 prikazuje primer lestvice za atribut ADEF. Matematično ozadje modela SoPCoM omogoča, da si uporabnik modela sam definira razrede in atribute za ocenjevanje elementov razreda.

Ker so posamezni atributi različno pomembni za različne barve, so atributom dodeljene tudi uteži, s katerimi uravnavamo to pomembnost. Zahtevnost posamezne barve izračunamo po obrazcu:

$$x_{c_p is} = \frac{1}{n_{c_p is}} \sum_{j=1}^{n_{c_p is}} u_{c_p ij} s_{c_p ij} \quad (1)$$

Pri tem z $x_{c_p is}$ označimo zahtevnosti i -te barve žetonov, z $n_{c_p is}$ število vseh atributov, s katerimi opišemo posamezni razred, $s_{c_p ij}$ so vrednosti, dodeljene posameznemu atributu in $u_{c_p ij}$ vrednosti uteži pomembnosti posameznega atributa za izbrano barvo žetonov. Zahtevnosti vseh barv žetonov (teh barv je n_c) združimo v vektorju $\mathbf{x}_{c_p s}$.

$\mathbf{C}_p = [\text{SZPO}, \text{EK}, \text{PT00}, \text{PT01}, \text{PT02}, \text{test environment, results, list of faults, messages, diary, PTEST}]^T$

For the evaluation of the artifacts, roles, infrastructure, software (SW) and hardware (HW), different attributes should be used for each of the mentioned groups. Therefore, the artifacts and resources are grouped according to their characteristics.

The list of the groups of artifacts and resources is presented as:

When more than one group of elements is defined, the membership of elements should be defined. For example, the Test Report is the color of token, which is a member of artifact group; the project manager is a color of a token, which is a member of the roles group. The dimension of the groups vector (\mathbf{G}_p) is the same as the number of different groups of tokens. The membership of each element is assigned by function d and saved in vector \mathbf{D}_p :

$$d : \mathbf{C}_p \rightarrow \mathbf{G}_p$$

$$\mathbf{D}_p = [d(c_{p1}), \dots, d(c_{pn_p}), \dots, d(c_{pn_{p_g}})]^T$$

3.2 Evaluation of the complexity of artifacts and resources

Each artifact and resource is evaluated according to an appropriate list of attributes and its complexity is saved in the vector:

Table 1 presents the list of attributes for all groups. For each attribute the pertaining measurement scale is defined. Table 2 presents the definition of the measurement scale for the ADEF attribute. The SoPCoM provides a mathematical mechanism which allows the user to identify his own groups and attributes.

Since individual attributes influence the complexity of the element differently, the weights are added to ensure an appropriate evaluation for each attribute. Complexity is expressed as:

where $x_{c_p is}$ is the complexity of i -th color of the tokens (i -th element), $n_{c_p is}$ is the number of all the attributes that describe the group, $s_{c_p ij}$ are the values assigned to each attribute for a specific element, and $u_{c_p ij}$ are the weights of influence for each attribute. The complexity of all n_c colors is then saved in the vector $\mathbf{x}_{c_p s}$.

Preglednica 1. Seznam skupin in pripadajočih atributov zahtevnosti
Table 1. List of groups and the pertaining complexity of attributes

SKUPINA GROUP	ATRIBUT ATTRIBUTE	OPIS DESCRIPTION
delovni proizvodi artifacts	ADEF	definiranost oblike / definition
	ARUS	ponovne uporabe / reusability
	ACON	upravljanje razporeda / configuration management
	AGEN	obveznost ustvarjanja / generating artefact req.
vloge roles	REXP	izkušnje / experience
	RSPC	specializacija / specialization
	RLEA	vodenje / leadership
	RCOM	sporočanje / communication
programska oprema software	SEXP	izkušnje / experiences
	SSUP	podpora / support
	SAVL	razpoložljivost / availability
	SEXC	izmenljivost podatkov / data exchange
	SALT	nadomestna orodja / alternative tools
strojna oprema hardware	HAVL	razpoložljivost / availability
	HPER	izvedbene karakteristike / performances
	HINT	povezljivost / interoperability
mesta places	PAVL	razpoložljivost / availability
	PTMP	temperatura / temparature
	PEQP	opremljenost / equipment
	PLOC	položaj / location

Preglednica 2. Merska lestvica za atribut ADEF

Table 2. Measurement scale for the ADEF attribute

Atribut: določenost oblike (ADEF)	
Attribute: definition (ADEF)	
0	Ni ustrezeno Not relevant
0.2	Oblika je natančno določena – obstaja predloga z vnosnimi polji, ki jo izpolnimo brez modifikacij, obstajajo navodila in primeri Form defined in details – template with detailed instructions and examples exists, no modifications of template needed
0.4	Oblika je določena – obstaja predloga, vendar jo je treba dopolniti in/ali spremeniti, obstajajo navodila Form defined – template with instructions exists, needed modifications of template
0.6	Določene so točke/gradniki, ki jih je treba izpolniti/uporabiti Basic elements of artifact are defined, no template
0.8	Oblika je slabo določena – obstajajo le smernice za oblikovanje Basic guidelines for generating the artifact are defined, no template
1	Oblika ni določena – zapis v naravnem jeziku, ne obstaja predloga Form is not defined, instructions do not exist, template does not exist

3.3 Določitev aktivnosti

Določimo vse aktivnosti in vsa mesta, na katerih bodo žetoni čakali na nadaljnjo obdelavo. Zapišemo jih v vektorjih \mathbf{T} in \mathbf{P} . Dimenziji vektorjev sta n_t in n_p .

3.4 Določitev tipa izvajanja aktivnosti

Ker se lahko aktivnosti v procesu izvajajo na različne načine in pri tem uporabljajo/generirajo različne delovne proizvode, je treba v PM ustrezeno predstaviti tudi te različne načine izvedbe

3.3 Definition of activities

All activities and places are listed in vectors \mathbf{T} and \mathbf{P} . The dimensions of the vectors are n_t and n_p .

3.4 Definition of types of activities

Some activities can be implemented in different ways when using/generating different artifacts. In Petri nets notation these different ways of performance for a specific activity should be modelled

posameznega prehoda. Predstavimo jih z barvami prehodov. Vsakemu prehodu dodelimo toliko barv, kolikor je število različnih možnih načinov izvedbe aktivnosti. Za vsako barvo prehoda nato določimo potrebne vhode in izhode (sl. 3).

Za primer na sliki 2 je t4 prehod, ki se lahko izvede na dva načina: en način je takšen, da v izdelku napako odkrijemo in drugi takšen, da napake ne odkrijemo. V obeh primerih so izhodi iz aktivnosti različni. Vektor barv prehodov je torej:

$$\mathbf{C}_t = [c_{t1}, c_{t2}, c_{t3}, c_{t4_1}, c_{t4_2}, c_{t5}, c_{t6}]$$

V modelu je predvideno, da lahko ima več prehodov tudi isto barvo, vendar se tak primer v praksi redko pojavlja. Za izračun pripravimo matriko tipa prehodov \mathbf{C} , kjer za vsak prehod zapišemo, kakšna je verjetnost za izvedbo posameznih barv, ki so mu določene.

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} c_{11} & \dots & c_{1n_t} \\ \vdots & & \vdots \\ c_{n_t 1} & \dots & c_{n_t n_t} \end{bmatrix}$$

pri čemer je:

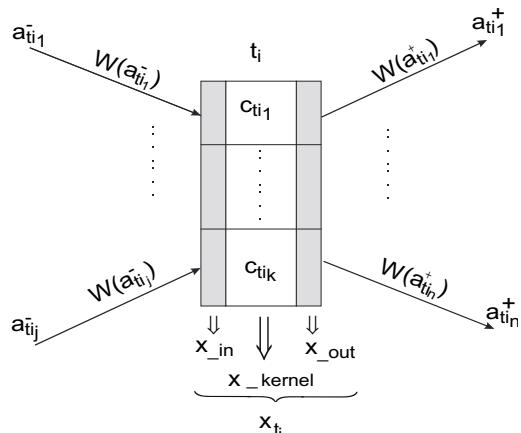
$$c_{ij} = \begin{cases} r; & 0 < r \leq 1; \text{ če barva pripada prehodu } t_i \\ 0; & \text{sicer} \end{cases}$$

3.5 Določitev zahtevnosti posameznega načina izvedbe aktivnosti

Podobno, kakor smo določili zahtevnost barv žetonov, določimo tudi zahtevnost posamezne barve prehodov, le da so tokrat uporabljeni atributi, ki so definirani za ocenjevanje zahtevnosti barv prehodov.

Zahtevnost vseh barv prehodov zapišemo v vektorju:

$$\mathbf{x}_{c_t s} = [x_{c_t 1s}, \dots, x_{c_t ls}, \dots, x_{c_t n_t s}]^T$$



Sl. 3. Prikaz barve in uteženosti povezav za prehod t_i
Fig. 3. Schematic representation of the colors of transition t_i

as well. They are modelled as colors of transitions. For each transition as many different colors are assigned as the number of different ways for performing the activity (see Figure 3).

In the example, presented in Figure 2, t4 is the transition, which can be performed in two ways: in the first case the faults in the tested element are found, and in the second case the faults are not found. In both cases different outputs are generated. The vector of colors of transitions is presented as:

The model also offers the possibility to assign the same color to different transitions, but in practice this is rare. For the computation of the complexity of each activity, the possibilities for the implementation of each color should be assigned. It is expressed in matrix \mathbf{C} .

where:

$$c_{ij} = \begin{cases} r; & 0 < r \leq 1; \text{ if the color belongs to } t_i \\ 0; & \text{otherwise} \end{cases}$$

3.5 Definition of complexity for each way of activity implementation

The complexity of the color of transitions is evaluated in a similar way to the complexity of the colors of tokens. For the evaluation of the complexity of the colors of transitions specific attributes are used.

The complexities of all colors of transitions are listed in vector:

S tem, ko smo določili posamezne barve in njihovo zahtevnost, smo si pripravili vhodne podatke za izračun zahtevnosti celotnega modela. Pri tem izračunu bo treba upoštevati, kolikokrat in kako se posamezna barva žetonov uporabi pri izvajanju aktivnosti. Te podatke predstavimo z utežitvijo povezav, ki vstopajo oziroma izstopajo iz prehoda.

3.6 Določitev povezav (možnih poti pri postopku) v mreži

Vhodne in izhodne povezave za vsak prehod predstavimo v pripadajočih dveh matrikah: v matriki vhodnih povezav (A^-) in matriki izhodnih povezav (A^+). Poljem v matriki povezav priredimo vrednost 1, če obstaja vhodna oziroma izhodna povezava med izbranim prehodom in mestom. Matriki sta dimenzije $[n_t \times n_p]$. V praksi so vrednosti teh matrik pripravljene avtomatsko hkrati, ko povežemo posamezno mesto in prehod.

3.7 Določitev vhodnih in izhodnih pogojev za izvedbo posameznega načina aktivnosti

Število potrebnih vhodnih žetonov, ki prispejo v prehod, določimo za vsako povezavo posebej (sl. 3). Za vsako barvo prehoda moramo določiti, koliko žetonov posamezne barve mora prispeti po tej povezavi, da bo na tej povezavi izpolnjen pogoj proženja. Število teh žetonov določimo v utežni matriki povezave (W^- in W^+) namreč. Takšne matrike je torej treba zapisati za vsako povezavo posebej.

Vse utežne matrike povezav združimo v ustrezni matriki utežnih matrik za vhodne povezave (Y^-) oziroma matriki utežnih matrik za izhodne povezave (Y^+). Dimenzijs matrik so razvidne iz spodnje matrike:

$$Y^- = \begin{bmatrix} W_{11}^- \\ \vdots \\ W_{n_t n_p}^- \end{bmatrix}$$

pri čemer je n_t število prehodov in n_p število mest.

3.8 Določitev vpliva vhodnih in izhodnih delovnih proizvodov na zahtevnost prehoda

V prejšnji točki smo določili število potrebnih vhodnih in izhodnih žetonov za proženje prehoda. Vendar ti žetoni nimajo vsi enakega vpliva na zahtevnost prehoda. Velika razlika je namreč v tem, ali na izhodu pripravimo čisto nov izdelek določenega tipa ali pa na izhod samo prenesemo nespremenjeno kopijo vhodnega izdelka. Na vhodu dodelimo vsem žetonom, ki predstavljajo delovne proizvode, utež 0,2. Drugim skupinam barv žetonov (vlogam, programski opremi, strojni opremi in prostorom) dodelimo utež

With the definition of the complexity of the colors of transitions only the basics for the computation of the whole process model were defined. What is still missing is the information about which tokens (inputs/outputs) are used/generated within each color of the transition and in what way these tokens are used. This information can be modelled by weights on the arcs entering/leaving the transition.

3.6 Definition of the arcs (paths) in the network

For each transition, input and output arcs are presented in two matrices: input-arcs matrix (A^-) and output-arcs matrix (A^+). The values in the matrices are 1 if the input/output arc between a specific place and transition exists, otherwise the value is 0. Matrices have the dimension $[n_t \times n_p]$. In practice, the dimensions of both matrices are generated automatically when drawing the arcs between places and transitions.

3.7 Definition of input and output constraints for each color of transition

The number of required input tokens which arrive at the transition within one arc has to be specified separately for each arc (see Figure 3). For each color of transition we should define how many tokens of a specific color should arrive in order to trigger the transition. The number of tokens is defined in arc-weight matrices W^- and W^+ . These two matrixes have to exist for each arc in the network.

All arc-weight matrices are joined into matrices of arc-weight matrices: for input arcs in Y^- and for output arcs in Y^+ . The dimensions of matrices are given below:

$$\dots \quad W_{1n_p}^- \\ \vdots \\ \dots \quad W_{n_t n_p}^-$$

n_t is the number of transitions and n_p is the number of places.

3.8 Definition of the influence of input and output artifacts on the complexity of a transition

In the previous step the number of required input/output colors was defined. Each token can have an influence on the complexity of the transition in a different way. The influence is different when, for example, within the transition a new artifact is generated and when within the transition the existing artifact is only reviewed and passed to the output as an unchanged token. For all input tokens representing artifacts the influence factor 0.2 is assigned. For other groups of tokens (roles, software, hardware, infrastructure) the influence factor 1 is assigned, since

1, saj s tem ponazorimo, da uporabimo določen vir na vhodu.

Za vse vire na izhodu postavimo uteži 0 in s tem ponazorimo, da so viri po izvedbi aktivnosti spet prosti. Za delovne proizvode postavimo uteži glede na to, ali se pojavljajo kot nespremenjena kopija vhodnega delovnega proizvoda (utež 0), ali so na novo pripravljeni delovni proizvodi (utež 1) ali se pojavljajo samo kot delno spremenjeni vhodni delovni proizvodi ($0 < \text{utež} < 1$). Vrednost je v zadnjem primeru določena glede na delež spremembe vhodnega delovnega proizvoda.

Vrednosti vpliva izhodnih žetonov so določene v matriki uteži vpliva zahtevnosti barv (\mathbf{H}^+). Matrika \mathbf{H}^+ je enakih dimenzij kakor matrika utežnih matrik povezav (\mathbf{Y}^+).

Za izračun zahtevnosti posamezne aktivnosti je treba upoštevati vpliv vsakega delovnega proizvoda, ki vstopa oziroma izstopa iz aktivnosti.

3.9 Izračun zahtevnosti posamezne aktivnosti

Na podlagi poprej naštetih podatkov izračunamo zahtevnost posameznega prehoda po naslednji enačbi:

$$\mathbf{x}_{ls}[i] = \sum_{j=1}^{n_q} \mathbf{C}[i, j] \cdot (x_in[i, j] + x_out[i, j]) \cdot x_kernel[j] \cdot 10 \quad (2)$$

pri čemer je:

$$x_in[i, j] = \sum_{k=1}^{n_p} \mathbf{A}^-[i, k] \cdot \sum_{l=1}^{n_{cp}} \mathbf{Y}^-[i, k, j, l] \cdot \mathbf{H}^-[\mathbf{D}_p[l]] \cdot \mathbf{x}_{c_ps}[l]$$

vsota vpliva vseh vhodnih žetonov,

$$x_out[i, j] = \sum_{k=1}^{n_p} \mathbf{A}^+[i, k] \cdot \sum_{l=1}^{n_{cp}} \mathbf{H}^+[i, k, j, l] \cdot \mathbf{x}_{c_ps}[l]$$

vsota vpliva vseh izhodnih žetonov in

$$x_kernel[j] = \mathbf{x}_{c_ps}[j]$$

vpliv jedra (posamezne barve) prehoda.

3.10 Izračun zahtevnosti celotnega modela postopka

Zahtevnost celotnega modela postopka izračunamo kot vsoto zahtevnosti vseh prehodov v mreži.

$$x_s = \sum_{i=1}^{n_m} \mathbf{x}_{ls}[i] \quad (3)$$

4 UPORABA IZRAČUNANIH VREDNOSTI ZAHTEVNOSTI MODELA POSTOPKA

Zahtevnost posameznih prehodov in zahtevnost celotnega modela postopka lahko pomagata pri ocenjevanju potrebnega truda za projekte,

this factor indicates that a specific resource is occupied.

For all output resources the influence factor (IF) 0 is assigned, indicating that after the completion of the transition the resource is available again. Influence factors for artifacts are assigned depending on three cases: if the output artifact is an unchanged copy of the input artifact, then IF=0; if the output artifact is newly generated then IF=1; and if the output artifact is changed from the input artifact then $0 < \text{IF} < 1$. The value in the last case is assigned according to the percentage of artifact change.

The values are saved in the influence factor of the color complexity matrix (\mathbf{H}^+). Matrix \mathbf{H}^+ has the same dimensions as the matrix \mathbf{Y}^+ .

To compute the complexity of each activity the influence of all input and output artifacts should be considered.

3.9 Computation of the complexity of each activity

Based on the gathered data in the previous steps the complexity of each activity can be computed according to the following equation:

where:

is the summary of the influence of all the input tokens,

is the summary of the influence of all the output tokens, and

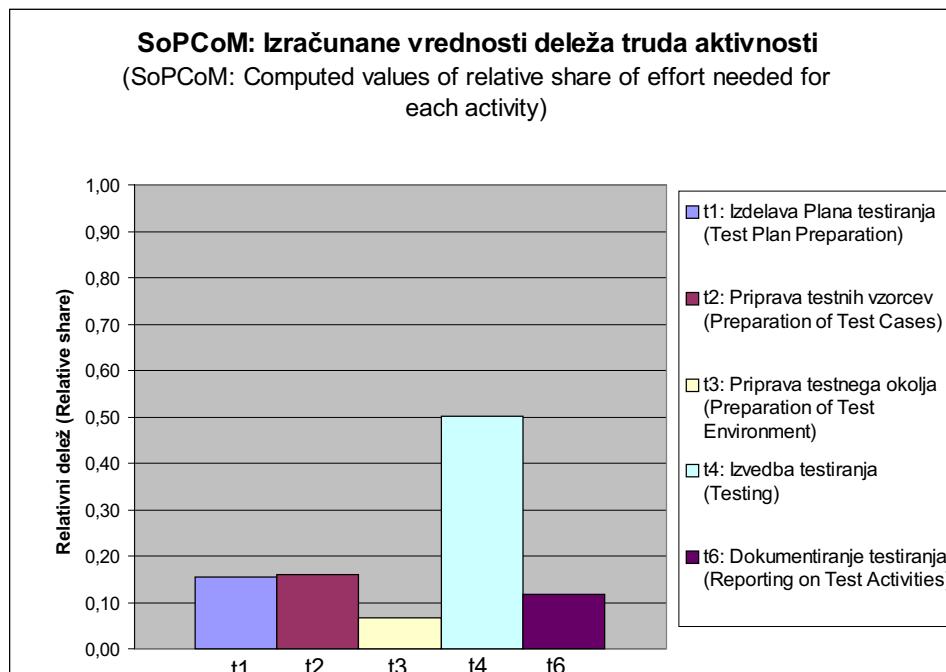
is the influence of each color of transition.

3.10 Computation of the complexity of a complete process model

The complexity of the complete process model is computed as a summary of the complexities of all the transitions in the network.

4 THE USE OF COMPUTED VALUES OF THE PROCESS-MODEL COMPLEXITY

The complexity of separate transitions and the complexity of the process model as a whole can be used for the evaluation of the effort needed for



S1. 4. *Delež zahtevnosti posameznih aktivnosti pri postopku testiranja*
 Fig. 4. *Relative share of the complexity of activities in the testing process*

ki bodo potekali po korakih, predvidenih v izbranem modelu postopka. Če namreč za posamezne prehode izračunamo njihov relativni delež v celotni zahtevnosti, dobimo podatke o deležu potrebnega truda za vsak prehod (aktivnost v projektu). Slika 4 prikazuje po modelu SoPCoM izračunane vrednosti in deleže zahtevnosti posameznih aktivnosti, predstavljenih na primeru postopka testiranja (sl. 2). Če pri izračunih zahtevnosti postopka modeliramo tudi druge vire, se absolutna zahtevnost postopkovnega modela zviša zaradi deleža, ki ga prispevajo posamezni žetoni drugih tipov na vhodu v aktivnosti (na izhodu ne vplivajo nič). Relativni delež zahtevnosti posameznih aktivnosti se v primeru, ki smo ga opisali v tem prispevku, ohranja z največjim odstopanjem 10%, kar je preverjeno tudi na drugih primerih v praksi.

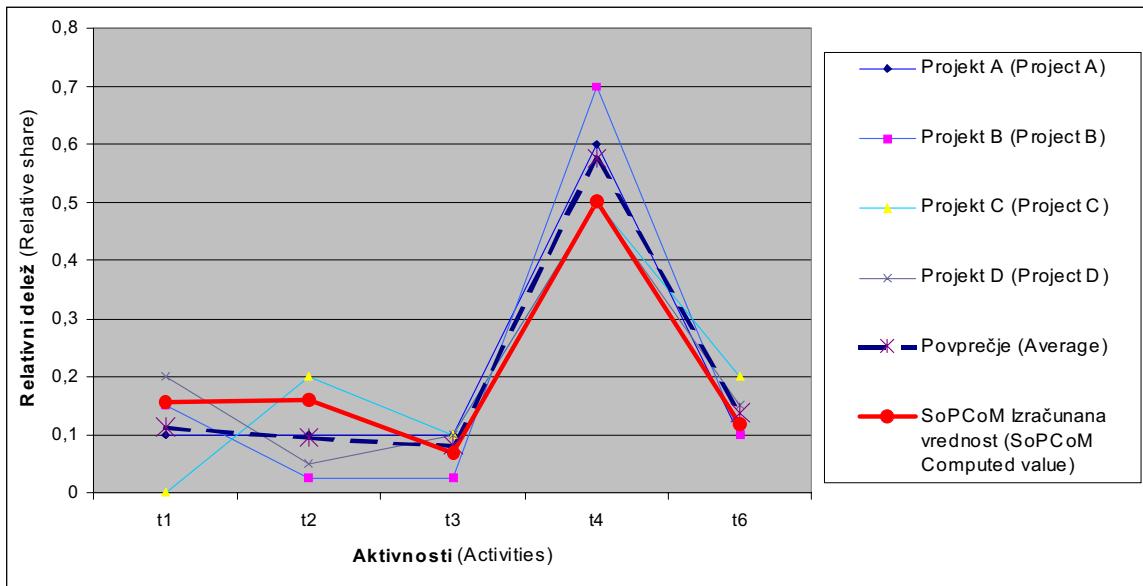
Slika 5 prikazuje rezultate preverjanja modela SoPCoM v praksi. Za štiri dejanske projekte smo pri zaposlenih izvedli modeliranje postopka ter vse potrebne ocene zahtevnosti. Ocene so podali sami zaposleni, ki so uporabo modela SoPCoM ocenili kot preprosto. Pri tem je treba upoštevati, da morajo zaposleni dejansko le pripraviti diagram poteka postopka ter ocene zahtevnosti posameznih gradnikov, ostalo delo pa opravi računalnik na osnovi ustrezne programske opreme.

Za primer Postopek testiranja smo preverili število dejansko obračunanih ur na posameznem projektu. Odstopanja dejanskih rezultatov in rezultatov izračuna po modelu SoPCoM odstopajo za največ 10%, kar je pri vnaprejšnjem ocenjevanju zelo dober približek ([7] do [9]).

projects which are performed according to the process model. If for each transition the complexity is known, the information about the required share of effort can be expressed for each transition (activity). Figure 4 shows the relative share of effort needed to implement each activity in the test process as presented in Figure 2. If other resources are also modelled the absolute value of complexity increases. The influence of input tokens on other colors (tokens representing resources) is added to the complexity of the model. Relative shares of the complexity in the example presented in this paper deviated by 10% according to shares where only artifacts were modelled. Similar results were also obtained in other cases.

Figure 5 presents the results of the practical verification of SoPCoM. For four different projects the employees provided all the required data for the description of the testing process. The employees evaluated the SoPCoM as easy to understand in those areas where they were involved. Employees only had to define the flow of the process and evaluate the complexity of each element within it according to predefined attributes. For the representation of the gathered information and further processing the software tool is used.

For the testing process the real data on used hours for the implementation of each activity in the four projects were gathered and compared to results given by the SoPCoM. SoPCoM values differ from the real data by up to 10% ([7] to [9]).



Sl. 5. Primerjava izračunanih in realnih vrednosti za delež truda aktivnosti v postopku testiranja
Fig. 5. Comparison of the SoPCoM and real data on the shares of effort for activities within the testing process

5 SKLEP

Model je bil uporabljen tudi na več drugih primerih, kjer se je izkazalo 10-odstotno odstopanje ocenjenih rezultatov od dejanskih podatkov o porabljenem času za izvajanje nalog, definiranih v obravnavanih primerih. Tovrstne rezultate je mogoče dosegči le v zrelih organizacijah z zreliimi postopki. V primeru, da organizacija formalne modele svojih postopkov še uveljavlja, lahko model SoPCoM rabi kot pomembno vodilo pri določevanju vseh potrebnih elementov procesnega modela.

Pri uporabi modela SoPCoM je treba ustrezno razrešiti tudi problem obsežnosti postopkovnega modela. Že v izbranem primeru odseka postopkovnega modela smo prišli do sorazmerno zahtevnih slik in obsežnih vhodnih podatkov. Če bi opisali postopkovni model v celoti, bi se srečali z mrežo, ki bi vsebovala veliko število prehodov, mest in povezav, prav tako bi bilo določenih veliko število barv mest in žetonov ter barv prehodov. Preglednost takšne mreže je težko zagotoviti brez podpore ustreznega orodja. Na Inštitutu za informatiko poteka razvoj orodja, ki olajša samo modeliranje in hkrati podpira algoritem modela SoPCoM.

5 CONCLUSION

The model has already been used in some other cases where a less-than 10% deviation of the SoPCoM results from the real data was also achieved. Such results can be achieved within mature organizations with mature processes. In cases where organizations are starting to establish the formal process model the SoPCoM could be used as a guideline for defining all the required elements within the process.

Further more, when using the SoPCoM, appropriate consideration should also be given to the extensiveness of the process model. Already for the simple example presented in this paper a complex figure presenting the process model was used, showing a relatively large number of artifacts. If the whole process of software development (not only the testing phase) were to be described, the process model would be very extensive. To deal with this extensiveness, an appropriate tool which supports the SoPCoM should be used. The SoPCoM Tool which is being developed at the Institute of informatics will support the modelling as well as the implementation of a SoPCoM algorithm.

6 LITERATURA 6 REFERENCES

- [1] Finkelstein, A., J. Kramer, B. Nuseibeh (1994) Software process modelling and technology. *Research Studies Press Ltd., John Willey & Sons Inc. New York.*
- [2] High-level Petri Nets - Concepts, definitions and graphical notation. *Committee Draft ISO/IEC 15909, October 2, 1997, Version 3.4.*
- [3] Proth, J.-M., Xie, X. (1996) Petri nets - a tool for design and management of manufacturing systems. *John Wiley & Sons, Inc. New York.*

- [4] Reisig, W., Rozenberg, G. (1998) Lectures on Petri nets I: Basic models. *Springer, Berlin.*
- [5] Jensen, K. (1996) Colored Petri nets: Basic concepts, analysis methods and practical use (Monographs in theoretical computer science). *Springer Verlag.*
- [6] <http://www.dsi.unimi/Users/Tesi/trompede/petri/nets/TPN.html>
- [7] Vajde Horvat, R., Rozman, I., Rozman, T. (2000) How to evaluate the complexity of software processes?, *23rd International Convention MIPRO 2000*, May 22-26, Opatija, Croatia, 29-32.
- [8] Vajde Horvat, R., Rozman, I., Rozman, T. (2000) SoPCoM - model za ocenjevanje kompleksnosti programskega procesov. Dnevi slovenske informatike, Portorož, Slovenija, 19.-22. april 2000. *Zbornik posvetovanja DS 2000*, Ljubljana: Slovensko društvo Informatika, del. 1, 121-129.
- [9] Vajde Horvat, R. (2000) Kompleksnost nadzora programskega procesa : doktorska disertacija. Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko, Maribor: [R. Vajde-Horvat], 159 f. + pril.

Naslova avtorjev: doc.dr. Romana Vajde Horvat
prof.dr. Tatjana Welzer Družovec
prof.dr. Ivan Rozman
Fakulteta za elektrotehniko,
računalništvo in informatiko
Univerze v Mariboru
Smetanova 17
2000 Maribor

doc.dr. Mirko Soković
Fakulteta za strojništvo
Univerze v Ljubljani
Aškerčeva 6
1000 Ljubljana

Authors' Addresses: Doc.Dr. Romana Vajde Horvat
Prof.Dr. Tatjana Welzer Družovec
Prof.Dr. Ivan Rozman
Faculty of Electrical Eng. and
Computer Science
University of Maribor
Smetanova 17
2000 Maribor, Slovenia

Doc.Dr. Mirko Soković
Faculty of Mechanical Eng.
University of Ljubljana
Aškerčeva 6
1000 Ljubljana, Slovenia

Prejeto: 19.6.2000
Received:

Sprejeto: 12.4.2001
Accepted:

Spremljanje trenutne frekvenčne vsebine pri zagonu pralnega stroja

Monitoring the Instantaneous Frequency Content of a Washing Machine during Startup

Igor Simonovski - Miha Boltežar

Fourierjeva integralska transformacija je zelo uporabno orodje za analizo frekvenčnega stanja ustaljenih procesov. Pogosto pa se srečujemo tudi z neustaljenimi procesi, pri katerih običajne Fourierjeve transformacije ne moremo uporabiti. Uporabiti moramo druge metode za spremljanje frekvenčne vsebine. V tem prispevku sta predstavljeni okenska Fourierjeva transformacija in novejsa zvezna valčna transformacija. Valčna transformacija je zaradi uporabe lokalno omejenih osnovnih funkcij primerna za opazovanje neustaljenih procesov. Uporabnosti omenjenih transformacij za spremljanje frekvenčne vsebine neustaljenega procesa smo ugotavljali na primeru zagona pralnega stroja. Izkazalo se je, da je zaznavnost trenutne vrtilne frekvence pri okenski Fourierjevi transformaciji slabša kakor pri zvezni valčni transformaciji. Raztros vrednosti pri okenski Fourierjevi transformaciji namreč ne omogoča zanesljive identifikacije trenutne vrtilne frekvence, ampak samo umestitev v določen frekvenčni interval. Z uporabo zvezne valčne transformacije smo bistveno zožili ta frekvenčni interval.

© 2001 Strojniški vestnik. Vse pravice pridržane.

(Ključne besede: procesi neustaljeni, transformacije Fourierjeve okenske, transformacije valčne zvezne, valčki Gaborjevi, stroji pralni)

The Fourier integral transform is a very useful tool for analyzing the frequency content of steady processes. When dealing with non-stationary processes, however, other methods for determining the frequency content must be applied. This paper deals with the windowed Fourier transform and, the more recent, wavelet transform. The windowed Fourier transform uses basic functions that have an unlimited definition range and requires multiplication of the observed process with a time-limited window function to be able to detect local non-stationarities. The wavelet transform uses basic functions that have a limited definition range for the same purpose. In this paper we compare the ability of the windowed Fourier transform and the continuous wavelet transform to monitor the frequency content of a non-stationary process—washing-machine startup. The results show that the windowed Fourier transform is inferior to the continuous wavelet transform. The wide spread of windowed Fourier transform values only makes it possible to roughly determine the instantaneous drum-spin frequency band. Using the continuous wavelet transform we were able to determine the instantaneous drum-spin frequency more accurately.

© 2001 Journal of Mechanical Engineering. All rights reserved.

(Keywords: non-stationary processes, windowed Fourier transform, continuous wavelet transform, Gabor wavelet, washing machine)

0 UVOD

Pri analizi nihanj se že vrsto let uporabljajo spektralne analize, ki temeljijo na Fourierjevi integralski transformaciji. Fourierjeva integralska transformacija je zaradi uporabe sinusnih in kosinusnih osnovnih funkcij primerna predvsem za opazovanje ustaljenih procesov. Če se v opazovanem procesu pojavitjo lokalne neustaljenosti, to vpliva na Fourierjevo integralsko transformacijo pri vseh frekvencah. Ta lastnost je pri

0 INTRODUCTION

Spectral analyses, based on the Fourier integral transform, have been present in the field of vibration analysis for years. Due to the sine and cosine basic functions, the Fourier integral transform is mostly appropriate for the analysis of stationary processes. If a local non-stationary appears in the observed process its influence is spread over the Fourier integral transform values

opazovanju neustaljenih procesov nezaželena, saj nas pri teh procesih pogosto zanima trenutek pojava spremembe ozziroma neustaljenosti v procesu. Prilagoditev Fourierjeve integralske transformacije za opazovanje neustaljenih procesov je okenska Fourierjeva transformacija [1]. Pri tej opazovani proces pomnožimo s časovno omejeno okensko funkcijo. Zunaj območja definiranosti okenske funkcije je zmnožek procesa in okenske funkcije enak nič.

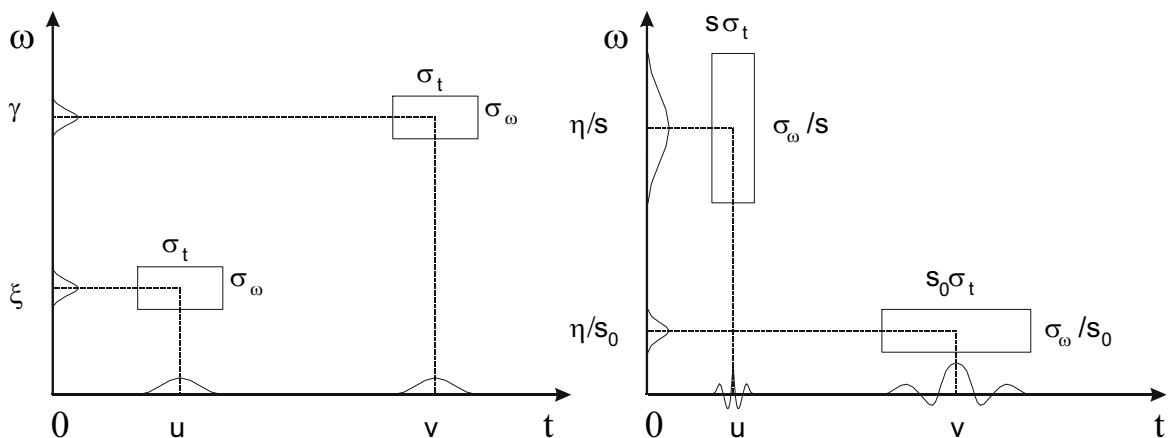
V novejšem času se je pojavila valčna transformacija, pri kateri vrednosti $f(t)$ koreliramo s skupino funkcij, katerih definicijsko območje je definirano na končnem območju $[a, b]$. Te funkcije lahko hkrati premikamo po časovni osi in skaliramo po frekvenčni osi [2]. Imenujemo jih valčki in jih označujemo s $\psi(t)$. Pomembna lastnost valčne transformacije je časovno-frekvenčno odvisen raztros valčka (sl. 1). Raztros valčka v časovnem območju je premo sorazmeren s skalo valčka, medtem ko je raztros valčka v frekvenčnem območju obratno sorazmeren s skalo valčka. Ta lastnost valčne transformacije omogoča prilaganje frekvenčne ločljivosti. Zaradi uporabe valčnih funkcij, ki imajo lokalno omejeno definicijsko območje, je valčna transformacija občutljiva za lokalne neustaljenosti. To je zelo pomembno pri analizi neustaljenih procesov. Zato je valčna transformacija primerena za zaznavanje napak v zobniških pogonih [3], [4], strojnih napravah [5], [6] in kompozitnih ploščah [7]. Na področju dinamike se valčna transformacija uveljavlja pri identifikaciji parametrov dinamskih sistemov ([8] do [12]), izračunu časovno odvisne frekvenčne odzivne funkcije [13], linearizaciji nelinearnih sistemov [14], [15] in zaznavanju držanja pri odrezovalnem procesu [16].

V tem prispevku primerjamo primernost okenske Fourierjeve in zvezne valčne transformacije za spremljanje frekvenčne vsebine neustaljenega procesa. Izbrani neustaljeni proces predstavlja meritev pospeškov pralne grupe pralnega stroja med zagonom. Pri dosedanjih analizah meritev pralnega stroja smo se osredotočili predvsem na spremljanje ustaljenega stanja.

at all frequencies and so the time at which the non-stationary appeared cannot be determined. To analyze a non-stationary process the windowed Fourier transform, which multiplies the observed process with a time-limited window function can be used [1]. Outside the window's definition range, the product of the process and the window function is equal to zero.

In recent years the wavelet transform has played an important role in analyzing non-stationary processes. This transform correlates the observed process, $f(t)$, with a family of functions defined on a finite interval $[a, b]$. These functions, called wavelets, $\psi(t)$, can be simultaneously translated in time and scaled in the frequency domain [2]. One important property of the wavelet transform is its varying time-frequency resolution, Figure 1. In the time domain, the wavelet spread is proportional to the wavelets' scale, while in the frequency domain the spread is inversely proportional to the wavelets' scale. This property makes it possible to vary the frequency or time resolution. Because the wavelet transform uses basic functions with a limited definition area, the wavelet transform is sensitive to the local non-stationarities. This is very important in the analysis of a non-stationary process. Thus far, the wavelet transform has been used for fault detection in gears [3], [4], machines [5], [6] and composite plates [7]. In the field of dynamics, the wavelet transform is used for parameter identification ([8] to [12]), calculating time-dependent frequency response functions [13], linearization of non-linear systems [14], [15] and chatter detection during cutting [16].

In this paper we compare the ability of the windowed Fourier transform and the continuous wavelet transform to monitor the frequency content of a non-stationary process—washing-machine startup. During startup the accelerations of the washing-machine complex have been measured. In



Sl. 1. Časovno-frekvenčna ločljivost okenske Fourierjeve (levo) in valčne transformacije (desno)
Fig. 1. The time-frequency resolution of the windowed Fourier (left) and the wavelet transform (right)

Narejene so bile spektralne analize drugega reda [18], pri katerih se je pokazalo, da je največ moči signala katerekoli merjene kinematične spremenljivke zbrane pri frekvenci ožemanja. Bispektralne analize meritev pralnega stroja so pokazale navzočnost kvadratičnih nelinearnosti [19]. Izkazalo se je, da druga, tretja in četrtja harmonska niso v celoti samostojna, temveč so delno tudi posledica kvadratičnega sklapljanja faz. Narejena je bila tudi analiza odzivov modela in meritev pralnega stroja v faznem prostoru [18]. Pregled lastnega dosedanjega dela na področju analiziranja in modeliranja dinamike pralnega stroja je podan v [20] in [21].

1 TEORETIČNE OSNOVE

1.1 Okenska Fourierjeva transformacija

Fourierjeva integralska transformacija funkcije $f(t)$ je definirana kot [17]:

$$\hat{f}(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \cdot e^{-i\omega t} \cdot dt = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \cdot [\cos(\omega \cdot t) - i \cdot \sin(\omega \cdot t)] \cdot dt \quad (1),$$

kjer pomeni $i=\sqrt{-1}$, ω pa krožno frekvenco v rad/s. Vrednost $\hat{f}(\omega)$ je v splošnem kompleksno število. Realni del $\hat{f}(\omega)$ opredeljuje amplitudo nihanja kosinusne funkcije pri frekvenci ω , imaginarni del $\hat{f}(\omega)$ pa amplitudo nihanja sinusne funkcije pri frekvenci ω . Kvadrat absolutne vrednosti $\hat{f}(\omega)$ poda moč funkcije $f(t)$ pri frekvenci ω . Iz izraza (1) je tudi razvidno, da lokalna neustaljenost vpliva na frekvenčno transformiranko $\hat{f}(\omega)$ pri vseh frekvencah ω . To je posledica dejstva, da je osnovna funkcija $e^{-i\omega t}$ definirana na območju $(-\infty, +\infty)$ zato h končni vrednosti integrala (1) prispevajo vsi dogodki, ne glede na čas njihovega pojava. Časovno-frekvenčna ločljivost Fourierjeve integralske transformacije je konstantna (sl. 1) [17].

Pojav okenske Fourierjeve transformacije $Sf(u, \omega)$ [1] pomeni prvi poskus omejitve vpliva oddaljenih vrednosti $f(t)$ na frekvenčno transformiranko $\hat{f}(\omega)$. Tu vrednosti $f(t)$ pomnožimo z okensko funkcijo $g_u(t)=g(t-u)$, ki je definirana na končnem območju $[a, b]$, zunaj tega območja pa je enaka nič. V skladu s tem se spremenijo integracijske meje, kar omogoči opazovanje neustaljenih pojavov.

$$Sf(u, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \cdot g_u^*(t) \cdot e^{-i\omega t} \cdot dt = \int_a^b f(t) \cdot g_u^*(t) \cdot e^{-i\omega t} \cdot dt \quad (2).$$

V gornjem izrazu pomeni znak * kompleksno konjugacijo. Graf gornjega izraza pogosto imenujemo spektrogram.

V praksi običajno ne poznamo vrednosti funkcije $f(t)$ pri vseh zahtevanih časih $(-\infty, +\infty)$, temveč samo v določenem časovnem območju $[0, T]$. Funkcijo $f(t)$ lahko razširimo na celotno območje $(-\infty, +\infty)$, tako da predpostavimo, da je funkcija $f(t)$ periodična s periodo T [17]:

preliminary analyses of the washing machine dynamics we focused mainly on the stationary. Second-order spectral analyses showed that for all measured signals the drum-spin frequency has by far the highest power level [18]. Bispectra analyses revealed the presence of quadratic-order non-linearities [19]. Second, third and fourth harmonics were partially generated by quadratic phase coupling. Analyses in phase space have been applied to responses of both the model and the real system [18]. A review of our previous work relating to the analysis of washing-machine non-linear dynamics can be found in [20] and [21].

1 THEORETICAL FOUNDATIONS

1.1 The windowed Fourier transform

The Fourier integral transform of the function is defined as [17]:

where i is $\sqrt{-1}$ and ω is the circular frequency in rad/s. The value of $\hat{f}(\omega)$ at a certain frequency ω is, in general, a complex number. The real and imaginary parts of $\hat{f}(\omega)$ represent the amplitude of the sine and cosine functions, oscillating at frequency ω . The absolute value of $\hat{f}(\omega)$ squared is the power at the frequency ω . It is evident from (1) that the local non-stationary affects the frequency transform of $\hat{f}(\omega)$ at all frequencies ω , a consequence of the basic function $e^{-i\omega t}$. Since its definition interval is $(-\infty, +\infty)$, the integration is carried out over this whole interval. The time-frequency resolution of the Fourier integral transform is constant and is presented in Figure 1, [17].

The windowed Fourier transform reduces the influence of time-distant events on the frequency transform, $\hat{f}(\omega)$, by multiplying the $f(t)$ with the time-limited window function $g_u(t)=g(t-u)$. The window function, $g_u(t)$, is defined on a finite interval $[a, b]$ and is equal to zero outside this interval. As a consequence, the integral limits change, which makes the windowed Fourier transform useful for observing non-stationary processes.

The symbol * in expression (2) denotes a complex conjugation. The graph of $Sf(u, \omega)$ is often referred to as a spectrogram.

In practice, the function $f(t)$ is usually only known in the time interval $[0, T]$. In this case $f(t)$ can be extended to the interval $(-\infty, +\infty)$ with periodization by T [17]:

$$f(t) = f(t \pm k \cdot T), \quad 0 \leq t \leq T, \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (3)$$

Vsako periodično funkcijo $f(t)$ s periodom T in definirano na območju $[0, T]$ pa lahko izrazimo z naslednjo vrsto:

$$f(t) = a_0 + 2 \cdot \sum_{k=1}^{\infty} a_k \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot k \cdot t}{T}\right) + b_k \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot k \cdot t}{T}\right), \quad 2 \cdot \pi \cdot k \cdot t = \omega \quad (4)$$

pri čemer so koeficienti a_k in b_k :

$$a_k = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T f(t) \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot k \cdot t}{T}\right) \cdot dt, \quad k \geq 0 \quad (5)$$

$$b_k = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T f(t) \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot k \cdot t}{T}\right) \cdot dt, \quad k \geq 0 \quad (6)$$

Izraza (5) in (6) lahko združimo, če uporabimo kompleksni zapis:

Any periodical function $f(t)$ with period T and defined in the interval $[0, T]$ can be expressed with the following series:

where coefficients a_k and b_k are:

$$X_k = a_k - i \cdot b_k \quad (7)$$

Ker velja:

Since:

$$e^{-i \cdot \left(\frac{2 \pi k \cdot t}{T}\right)} = \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot k \cdot t}{T}\right) - i \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot k \cdot t}{T}\right) \quad (8)$$

lahko zapišemo naslednji izraz za X_k :

the following expression can be written:

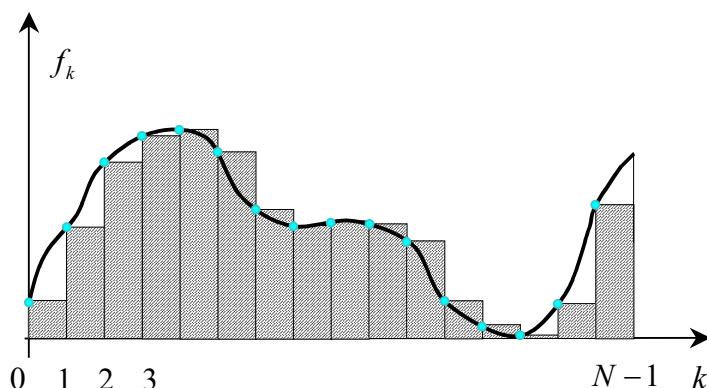
$$X_k = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) \cdot e^{-i \cdot \left(\frac{2 \pi k \cdot t}{T}\right)} \cdot dt, \quad k \geq 0 \quad (9)$$

V praksi običajno ne poznamo vseh vrednosti $f(t)$. Opazovani proces vzorčimo s frekvenco vzorčenja $f_s = 1/\Delta t$, tako da poznamo samo vrednosti pri diskretnih časih $f_k = f(k \cdot \Delta t)$, $k = 0, 1, 2, \dots, N-1$. Oznaka Δt pomeni časovni razmik med dvema sosednjima diskretnima točkama, N pa število točk diskretizacije, sl 2. Integral (9) izračunamo z numerično integracijo, kjer periodo T zapišemo kot $T = N \cdot \Delta t$:

In practice $f(t)$ is usually known only for discrete time indexes. The observed process $f(t)$ is sampled with the sampling frequency $f_s = 1/\Delta t$, therefore only the values $f_k = f(k \cdot \Delta t)$, $k = 0, 1, 2, \dots, N-1$ are known. The symbol N denotes the number of sampled points while Δt stands for the time delay between sampled points, Figure 2. The integral (9) is calculated using numerical integration, where period T is written as $T = N \cdot \Delta t$:

$$X_k = \frac{1}{T} \cdot \sum_{j=0}^{j=N-1} x_j \cdot e^{-i \cdot \left(\frac{2 \pi k \cdot (j \cdot \Delta t)}{T}\right)} \cdot \Delta t \quad (10)$$

$$X_k = \frac{1}{N} \cdot \sum_{j=0}^{j=N-1} x_j \cdot e^{-i \cdot \left(\frac{2 \pi k \cdot j}{N}\right)} \quad (11)$$



Sl. 2. Diskretizacija zvezne funkcije
Fig. 2. Discretized continuous function

Izraz (11) poznamo pod imenom "diskretna Fourierjeva transformacija". Če se na začetku signala $f(t)$ pojavi neustaljenost, ki kasneje izgine, ta neustaljenost vpliva na vse člene a_k , b_k . Ta zakonitost izhaja iz izrazov (5) in (6). Členi a_k in b_k pomenijo diskretno Fourierjevo transformiranko diskretiziranega signala f_k . Začasna neustaljenost v signalu torej vpliva na koeficiente celotne diskretne Fourierjeve transformacije. Ta lastnost otežuje analizo lokalnih lastnosti pojava, zaradi česar je Fourierjeva transformacija primerna predvsem za analizo ustaljenih pojavov.

1.2 Zvezna valčna transformacija

Valček $\psi(t)$ je normirana funkcija z nično povprečno vrednostjo:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |\psi(t)|^2 \cdot dt = 1 \quad (12),$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t) \cdot dt = 0 \quad (13).$$

Skupino valčnih funkcij, ki jih uporabimo pri zvezni valčni transformaciji, dobimo s skaliranjem valčka $\psi(t)$ po frekvenčni osi s koeficientom "s" (skalirni koeficient) in s premikanjem valčka po časovni osi s parametrom premika "u". Skaliran in premaknjen valček označimo s $\psi_{u,s}(t)$:

$$\psi_{u,s}(t) = \frac{1}{\sqrt{s}} \cdot \psi\left(\frac{t-u}{s}\right) \quad (14).$$

Tako skaliran valček ohrani lastnost normiranosti. Na časovni osi je središče $\psi_{u,s}(t)$ pri "u", frekvenčna razsežnost pa je sorazmerna s skalo "s". Frekvenčno transformacijo valčka $\psi_{u,s}(t)$ dobimo z uporabo pravil o translaciji in skaliranju Fourierjevih transformirank:

$$\hat{\psi}_{u,s}(\omega) = e^{-i \cdot u \cdot \omega} \cdot \sqrt{s} \cdot \hat{\psi}(s \cdot \omega) \quad (15),$$

kjer $\hat{\psi}(\omega)$ pomeni Fourierjevo transformacijo nepremaknjenega in neskalaranega valčka $\psi(t)$. Zvezna valčna transformacija $Wf(u,s)$ je definirana kot:

$$Wf(u, s) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \cdot \psi_{u,s}^*(t) \cdot dt = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \cdot \frac{1}{\sqrt{s}} \cdot \psi^*\left(\frac{t-u}{s}\right) \cdot dt \quad (16).$$

Graf gornjega izraza pogosto imenujemo skalogram. Valček $\psi_{u,s}(t)$ je funkcija, ki je definirana na končnem območju $[a, b]$, zato je valčna transformacija občutljiva na lokalne neustaljenosti. Če se v funkciji $f(t)$ v določenem trenutku pojavi prehodni pojav, se bo pokazal le na valčni transformiranki v okolici tega pojava. Prehodni pojav ne bo vplival na valčno transformiranko pri časovnih vrednostih "u", ki so oddaljene od trenutka njegovega pojava in trajanja. Valčne funkcije so lahko realne ali kompleksne. Realne valčne funkcije uporabljam, če želimo zaznati močne prehodne pojave. Kompleksni valčki so primerni za časovno opazovanje frekvenčnih sprememb v prehodnih pojavih.

Expression (11) is known as the "discrete Fourier transform" (DFT). Coefficients a_k and b_k can therefore be obtained from classical DFT routines. If non-stationary appears at the beginning of the signal and later vanishes, it influences all coefficients a_k and b_k . This property is the result of integrating over the whole period T ((5) and (6)) and makes it difficult to analyze local events in the signal. Consequently, the Fourier transform is used primarily for analyzing stationary processes.

1.2 The continuous wavelet transform

The wavelet $\psi(t)$ is a normalized function with an average value of zero:

The continuous wavelet transform uses a family of wavelet functions. Scaling a wavelet function $\psi(t)$ by "s" and translating it by "u" creates this family of wavelet functions. These two coefficients are called the scaling factor and the translation parameter, respectively. The scaled and translated wavelet is denoted as $\psi_{u,s}(t)$:

$$\text{and remains normalized. On the time scale } \psi_{u,s}(t) \text{ is centered at "u". The frequency resolution is proportional to scale "s". The frequency transform of the wavelet } \psi_{u,s}(t) \text{ is obtained from Fourier transform rules for translation and scaling:}$$

where $\hat{\psi}(\omega)$ represents the Fourier transform of untranslated and unscaled $\psi(t)$. The continuous wavelet transform $Wf(u,s)$ is defined as:

The graph of $Wf(u,s)$ is often referred to as a scalogram. Because the wavelet $\psi_{u,s}(t)$ is defined on a finite interval $[a, b]$, the continuous wavelet transform is sensitive to local events (non-stationarities). The local transient reflects on the continuous wavelet transform only when the transient appears and only for the duration of the transient. The continuous wavelet transform that is distanced in time from a local transient is unaffected by it. Wavelet functions can be real or complex, real wavelets are often used to detect sharp signal transitions. Measuring the time evolution of frequency transients requires the use of a complex wavelet which can separate amplitude and phase components.

Inverzna zvezna valčna transformacija je definirana kot:

$$f(t) = \frac{1}{C_\psi} \int_0^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} Wf(u, s) \cdot \frac{1}{\sqrt{s}} \cdot \psi\left(\frac{t-u}{s}\right) \cdot du \cdot \frac{ds}{s^2} \quad (17),$$

pri čemer je:

$$C_\psi = \int_0^{+\infty} \frac{|\hat{\psi}(\omega)|}{\omega} \cdot d\omega < +\infty \quad (18).$$

Dodatno se zahteva, da je valček $\psi_{u,s}(t)$ realna funkcija [17].

1.3 Izračun zvezne valčne transformacije

Obravnavajmo diskreten signal z N točkami:

$$f_k = f(k \cdot \Delta t), \quad k = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (19).$$

Signal f_k je poznan samo v časovnem območju:

$$t_0 = 0 \leq t \leq (N-1) \cdot \Delta t = t_1 \quad (20),$$

zato se meje integracije v izrazu za zvezno valčno transformacijo spremenijo v:

$$Wf(u, s) = \int_{t_0}^{t_1} f(t) \cdot \psi_{u,s}^*(t) \cdot dt = \int_0^{(N-1)\cdot\Delta t} f(t) \cdot \frac{1}{\sqrt{s}} \cdot \psi\left(\frac{t-u}{s}\right) \cdot dt \quad (21).$$

Za določen vnaprej izbran časovi razmik " $u=n \cdot \Delta t$ " in skalo "s" izračunamo gornji izraz z numerično integracijo:

$$Wf(n \cdot \Delta t, s) = \sum_{m=0}^{m=N-1} f(m \cdot \Delta t) \cdot \frac{1}{\sqrt{s}} \cdot \psi^*\left(\frac{m \cdot \Delta t - n \cdot \Delta t}{s}\right) \cdot \Delta t \quad (22),$$

pri čemer smo predpostavili, da imata diskretni signal f_k in valčna funkcija $\psi_{u,s}(t)$ enako dolžino na časovni osi. Če označimo:

$$\psi_{k,s}^* = \frac{1}{\sqrt{s}} \cdot \psi^*\left(\frac{k \cdot \Delta t}{s}\right) \quad (23),$$

lahko zapišemo numerično integracijo kot:

$$Wf(n \cdot \Delta t, s) = \Delta t \cdot \sum_{m=0}^{m=N-1} f_m \cdot \psi_{m-n,s}^* \quad (24).$$

Izraz (24) zelo spominja na diskretno konvolucijo. S spremembo indeksov vektorja $\psi_{m-n,s}^*$ lahko gornji izraz spremenimo tako, da ga izračunamo z diskretno konvolucijo. V vektorju $\psi_{m-n,s}^*$ obrnemo vrstni red indeksov. Naredimo nov vektor $\bar{\psi}_{k,s}$, katerega prvi element je zadnji element vektorja $\psi_{m-n,s}^*$. Drugi element vektorja $\psi_{m-n,s}^*$ je predzadnji element vektorja $\psi_{m-n,s}^*$ in tako naprej.

$$\bar{\psi}_{k,s} = \psi_{N-1-k,s}^*, \quad k = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (25).$$

Končni izraz za izračun zvezne valčne transformacije se torej glasi:

The inverse continuous wavelet transform can be defined as:

where:

Expression (17) requires the wavelet $\psi_{u,s}(t)$ to be a real function [17].

1.3 Calculation of the continuous wavelet transform

Suppose we have a discrete signal with N points:

$$k = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (19).$$

Signal f_k is known only in the time interval:

Consequently, integration limits in the expression for the continuous wavelet transform change to:

For the given translation " $u=n \cdot \Delta t$ " and scale "s", expression (21) is calculated using numerical integration:

where the assumption has been made that the discrete signal f_k and the wavelet function $\psi_{u,s}(t)$ both have the same length on the time scale. We denote:

and the numerical integration can be written as:

$$Wf(n \cdot \Delta t, s) = \Delta t \cdot \sum_{m=0}^{m=N-1} f_m \cdot \psi_{m-n,s}^* \quad (24).$$

Expression (24) is similar to the expression for discrete convolution. If we change the indexes of vector $\psi_{m-n,s}^*$, expression (24) can be adapted in such a way that we can calculate it using discrete convolution. We take vector $\psi_{m-n,s}^*$ and reverse its indexes. We denote the newly obtained vector as $\bar{\psi}_{k,s}$.

$$k = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (25).$$

Finally, the expression for calculating the continuous wavelet transform using discrete convolution is:

$$Wf(n \cdot \Delta t, s) = \Delta t \cdot \sum_{m=0}^{m=N-1} f_m \cdot \bar{\psi}_{n-m, s} = \Delta t \cdot f \otimes \bar{\psi}_{n, s} \quad (26)$$

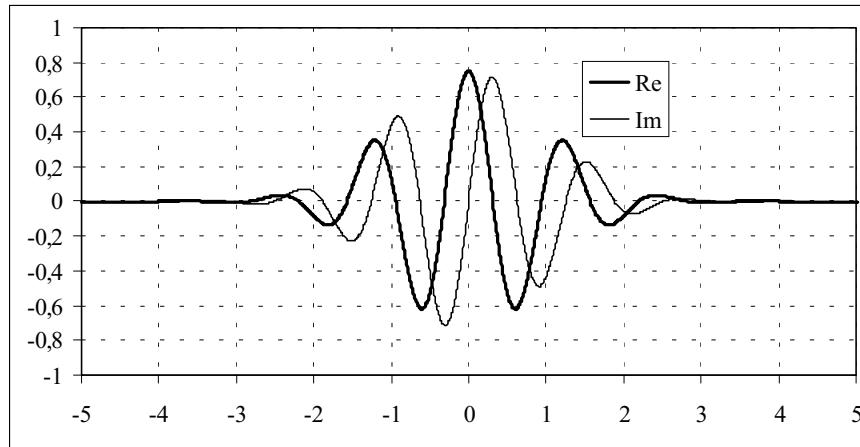
Konvolucija v časovnem območju postane množenje v frekvenčnem območju. Za prehod v frekvenčno območje lahko uporabimo algoritom hitre Fourierjeve transformacije. Pri izbranem časovnem razmiku "u" in skali "s" obrnemo vrstni red indeksov vektorja $\hat{\psi}_{m-n, s}^*$, da dobimo vektor $\bar{\psi}_{n-m, s}$. Če je valčna funkcija pri "u=0" simetrična, zamenjava indeksov ne spremeni ničesar. V tem primeru lahko to zamenjavo preskočimo. Nato izračunamo hitro Fourierjevo transformacijo vektorjev f_m in $\bar{\psi}_{n-m, s}$ ter jih medsebojno pomnožimo. Na koncu dobimo zvezno valčno transformacijo pri določenem časovnem razmiku "u" in skali "s" z obratno Fourierjevo transformacijo pomnoženih vektorjev. Zadnji korak je še množenje s Δt , ki pa ga večina avtorjev ne izvede. Postopek ponovimo pri preostalih skalah "s".

1.4 Gaborjev valček

Gaborjev valček (sl. 3) dobimo z množenjem Gaussove okenske funkcije in $e^{i \cdot \eta \cdot t}$:

$$w_{Gauss}(t, \sigma) = \frac{1}{(\sigma^2 \cdot \pi)^{\frac{1}{4}}} \cdot e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}} \quad (27)$$

$$\psi_{Gabor}(t, \sigma, \eta) = \frac{1}{(\sigma^2 \cdot \pi)^{\frac{1}{4}}} \cdot e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}} \cdot e^{i \cdot \eta \cdot t} \quad (28)$$



Sl. 3. Gaborjev valček
Fig. 3. The Gabor wavelet

Koeficient η je odvisen od frekvence vzorčenja in izbrane začetne skale. Skaliran in premaknjen Gaborjev valček dobimo iz izraza (14):

$$\psi_{Gabor_{u, s}}(t, \sigma, \eta) = \frac{1}{\sqrt{s}} \cdot \frac{1}{(\sigma^2 \cdot \pi)^{\frac{1}{4}}} \cdot e^{-\left(\frac{t-u}{s}\right)^2 \cdot \frac{1}{2\sigma^2}} \cdot e^{i \cdot \eta \cdot \frac{t-u}{s}} \quad (29)$$

Gaborjev valček spada med analitične valčke. Za Gaborjev valček lahko dobimo povezavo

Because convolution in the time domain is multiplication in the frequency domain, convolution is carried out in the frequency domain. We can recapitulate the procedure for calculating the continuous wavelet transform. First we select the translation "u" and "s". Next the indexes of vector $\hat{\psi}_{m-n, s}^*$ are changed according to (25) to obtain vector $\bar{\psi}_{n-m, s}$. If the wavelet function is symmetrical at "u=0" the reversal of indexes is not necessary. The Fourier discrete transform of vectors f_m and $\bar{\psi}_{n-m, s}$ is calculated. Fourier transforms of these two vectors are then multiplied index by index to calculate the convolution in the frequency domain. An inverse Fourier transform is performed to obtain the convolution in the time domain. Lastly, we must multiply the resulting vector by Δt , although many authors omit this step. The procedure is repeated for other scales "s".

1.4 The Gabor wavelet

The Gabor wavelet, Figure 3, is obtained by multiplying the Gaussian windows by $e^{i \cdot \eta \cdot t}$:

$$w_{Gauss}(t, \sigma) = \frac{1}{(\sigma^2 \cdot \pi)^{\frac{1}{4}}} \cdot e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}} \quad (27)$$

$$\psi_{Gabor}(t, \sigma, \eta) = \frac{1}{(\sigma^2 \cdot \pi)^{\frac{1}{4}}} \cdot e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}} \cdot e^{i \cdot \eta \cdot t} \quad (28)$$

Coefficient η depends on the sampling frequency and the selected initial scale. The scaled and translated Gabor wavelet is obtained from (14):

The Gabor wavelet belongs to the family of analytical wavelets. The relationship between the

med skalo in frekvenco iz Fourierjeve integralske transformacije skaliranega in premaknjenega Gaborjevega valčka (22):

$$\hat{\psi}_{Gabor\ u, s}(\omega, \sigma, \eta) = (4 \cdot \pi \cdot \sigma^2 \cdot s^2)^{\frac{1}{4}} \cdot e^{-i \cdot \omega \cdot u} \cdot e^{-\left(\frac{\omega - \eta}{s}\right)^2 \cdot \frac{\sigma^2 \cdot s^2}{2}} \quad (30).$$

Velja torej naslednja povezava med skalo in frekvenco:

$$\omega = \frac{\eta}{s}, f = \frac{\eta}{2 \cdot \pi \cdot s} \quad (31).$$

Pri diskretnih signalih mora biti izpolnjen Nyquistov kriterij:

$$f_{\max} \leq \frac{1}{2 \cdot \Delta t} = \frac{f_s}{2} \quad (32),$$

iz česar lahko izračunamo vrednost koeficiente η :

$$\eta = \frac{s_{\min} \cdot \pi}{\Delta t} \quad (33),$$

pri čemer s_{\min} izberemo glede na potrebno časovno oziroma frekvenčno ločljivost (sl. 1).

2 ANALIZA ZAGONA PRALNEGA STROJA

Pri zagonu pralnega stroja smo merili pospeške pralne grupe v vertikalni in horizontalni smeri (sl. 4). Pralna grupa je del pralnega stroja ter jo sestavljajo kad z rotirajočim bobnom, dodana utež, elektromotor in vibroizolacija. V bobnu je na največjem polmeru pritrjena ekscentrična masa. Pri vrtenju bobna povzroči ekscentrična masa neuravnoveženost, s katero lahko simuliramo najslabšo mogočo porazdelitev perila pri pranju. Podrobnosti o meritvah so podane v [18] in [19]. Uporabljena je bila frekvanca vzorčenja $f_s=1000$ Hz. Število diskretnih točk je bilo 30000, kar pomeni časovno 30 s. Izmerjenim 30000 točkam smo na koncu dodali še 2768 diskretnih ničel, tako da smo dobili celotno dolžino $32768=2^{15}$ diskretnih točk. Pri zagonu smo spremajali časovno spremicanje frekvenčne slike pospeškov pralne grupe pralnega stroja. Časovno spreminjačo se frekvenčno sliko smo dobili iz pospeškov z izračunom okenske Fourierjeve (spektrogram) in zvezne valčne

scale and the frequency can be obtained from the Fourier integral transform of the scaled and translated Gabor wavelet (22):

$$\hat{\psi}_{Gabor\ u, s}(\omega, \sigma, \eta) = (4 \cdot \pi \cdot \sigma^2 \cdot s^2)^{\frac{1}{4}} \cdot e^{-i \cdot \omega \cdot u} \cdot e^{-\left(\frac{\omega - \eta}{s}\right)^2 \cdot \frac{\sigma^2 \cdot s^2}{2}} \quad (30).$$

The relationship between the scale and frequency is:

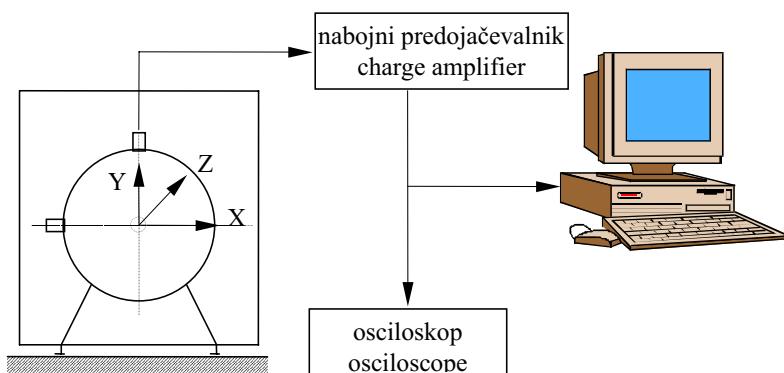
When using discretized signals, the Nyquist criterion must be satisfied:

and the value of the η coefficient can be calculated:

Parameter s_{\min} is selected in accordance with the desired time or frequency resolution, see Figure 1.

2 WASHING-MACHINE STARTUP ANALYSIS

Horizontal and vertical accelerations of a washing-machine complex were measured, Figure 4. The washing-machine complex is made up of: the tub in which the drum is rotating; additional weights; the electromotor attached to the tub and the suspension arms holding the tub as vibroisolation. In the drum of the washing-machine complex an excentrical mass was fixed at the maximum radius, to unbalance the rotating parts and simulate the worst possible laundry distribution. Details of the measurements are given in [18] and [19]. A sampling frequency of $f_s=1000$ Hz was used and the length of all measurements was 30000 discrete points, which is equivalent to 30 s. 2768 discrete zeroes were appended to the 30000 measured points, giving a final length of $32768=2^{15}$ discrete points. During startup, the spectral content of the washing-machine accel-



Sl. 4. Shema merilne verige pralnega stroja

Fig. 4. The experimental set-up

transformacije (skalogram). Spremljanje frekvenčne slike z dvema različnima integralskima transformacijama je omogočilo vpogled v razlike med obema izračunoma. Ker je okenska Fourierjeva transformacija v primerjavi z valčno transformacijo že po svoji naravi manj primerna za opazovanje neustaljenih pojavov, smo okensko Fourierjevo transformacijo izračunali na dva načina:

- Z uporabo 512 vhodnih točk v rutini FFT, brez dodajanja ničel. Frekvenčna ločljivost pri teh izračunih je $\Delta f=1,953$ Hz.
- Z uporabo $512+1536=2048=2^{11}$ vhodnih točk v rutini FFT. 512 točk je predstavljalo točke meritve, preostalih 1536 točk pa je bilo ničel. Ničle smo dodali z namenom izboljšanja frekvenčne ločljivosti. Frekvenčna ločljivost pri teh izračunih je $\Delta f=0,488$ Hz.

Uporabili smo Gaussovo okensko funkcijo, ki smo jo premikali po signalu meritve za 10 diskretnih točk v smeri naraščanja časovnih indeksov. Zvezno valčno transformacijo smo izračunali z uporabo Gaborjevega valčka, ki nastane iz Gaussove okenske funkcije. Zaradi primerljivosti so spektrogrami in skalogrami izračunani z istima frekvenčnima ločljivostima (1,953 in 0,488 Hz). Podatki o izračunu spektrogramov so podani v preglednici 1, podatki o izračunu skalogramov pa v preglednici 2.

Preglednica 1. Podatki o parametrih izračuna spektrogramov

Tabel 1. Spectrogram calculation data

	Spektrogram $\Delta f=1,953$ Hz Spectrogram	Spektrogram $\Delta f=0,488$ Hz Spectrogram
okenska funkcija window function	Gaussova Gaussian	Gaussova Gaussian
zamik okenske funkcije window function shift	10 [diskrete točke] 10 [discrete points]	10 [diskrete točke] 10 [discrete points]
širina okenske funkcije brez ničel window function width without zeroes	512	512
število dodanih ničel added zeroes	0	1536
skupno število točk overall number of points	512	2048
frekvenčna ločljivost frequency resolution	1,953 Hz	0,488 Hz

Preglednica 2. Podatki o parametrih izračuna skalogramov

Tabel 2. Scalogram calculation data

	Skalogram $\Delta f=1,953$ Hz Scalogram	Skalogram $\Delta f=0,488$ Hz Scalogram
valček wavelet	gabor	gabor
S_{\min}	2	2
σ	1,5	1,5
spodnja meja računanega frekvenčnega območja lower frequency bound	2 Hz	2 Hz
zgornja meja računanega frekvenčnega območja higher frequency bound	50 Hz	50 Hz
frekvenčna ločljivost frequency resolution	1,953 Hz	0,488 Hz

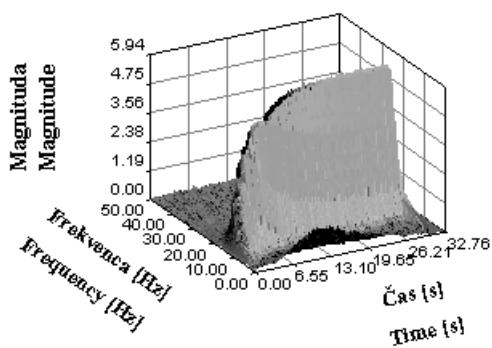
erations was monitored by calculating the windowed Fourier transform (spectrograms) and the continuous wavelet transform (scalograms). By using two different approaches we were able to compare both methods. The windowed Fourier transforms were calculated with two frequency resolutions:

- Number of points in the FFT procedure 512, no zero padding. Frequency resolution $\Delta f=1.953$ Hz;
- Number of points in the FFT procedure $512+1536=2048=2^{11}$, 512 measured points and 1536 zero padded points. Frequency resolution $\Delta f=0.488$ Hz.

The Gaussian window function was used. Window functions were time-shifted by 10 discrete points in the direction of increasing time indexes. Continuous wavelet transforms were calculated using the Gabor wavelet, which comes from the Gaussian window function. Spectrograms and scalograms were calculated with two frequency resolutions (1.953 and 0.488 Hz). Details of the spectrogram and scalogram calculations are given in Tables 1 and 2.

2.1 Primerjava spektrogramov in skalogramov

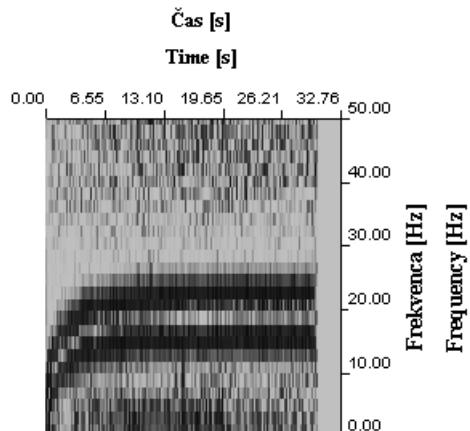
Na slikah 5 do 8 so prikazani spektrogrami in skalogrami horizontalnih pospeškov pralne grupe pralnega stroja pri zagonu. Slika 5 prikazuje magnitudo spektrograma. Zaradi preglednosti je prikazano le frekvenčno območje od 0 do 50 Hz. Levi del slike prikazuje skalogram v prostoru, desni del pa tlorisno projekcijo. Frekvenčna ločljivost je 1,953 Hz. Na sliki lahko vidimo greben, katerega magnituda in frekvenca s časom naraščata. Greben je dejansko magnituda koeficientov Fourierjeve transformacije, sestavljajo ga močnostni spektri izračunani pri določenih časovnih indeksih. Zaradi zagona frekvenca s časom narašča. Amplituda nihanja se povečuje, posledično pa se večajo tudi koeficienti izračunane okenske Fourierjeve transformacije. Poleg povečevanja frekvence zaganjanja drugih zaznavnih frekvenčnih komponent ni opaziti. Tu je treba poudariti, da je magnitudna os prikazana na linearini in ne na logaritemski skali. Po 30 s lahko opazimo, da je magnitudo spektrograma enaka nič. To je posledica dejstva, da je imela uporabljeni meritev le 30000 točk, kar časovno ustreza 30 s. Za 30000 diskretnimi točkami pa smo v signal dodali dodatne ničle, tako da smo dobili skupno dolžino signala 32768 točk. Po 30 s torej ni več amplitudo nihanj, magnitudni spektri morajo biti enaki nič pri vseh frekvenkah, to pa lahko tudi vidimo na izračunanih spektrogramih. Zaradi uporabe $2^{15}=32768$ točk smo lahko za izračun skalogramov uporabili postopek hitre Fourierjeve transformacije, kar je pospešilo numerični izračun. Opazimo lahko, da je slika tlorisne projekcije spektrogramov zelo nejasna. Ta nejasnost je posledica slabe frekvenčne ločljivosti in uporabe sinusnih (kosinusnih) funkcij, ki jih uporablja Fourierjeva transformacija za dekompozicijo signala. Raztros moči na sosednje frekvence bi lahko zmanjšali z boljšo izbiro okenske funkcije, vendar bi s tem zmanjšali primerljivost spektrograma in skalograma. Tako pa smo pri okenski Fourierjevi in zvezni valčni



Sl. 5. Spektrogram, frekvenčna ločljivost 1,953 Hz
Fig. 5. The spectrogram, frequency resolution 1.953 Hz

2.1 Comparison of spectrograms and scalograms

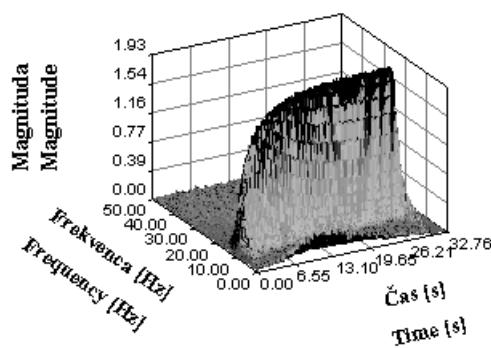
Figures 5 through 8 show the spectrograms and scalograms of the washing-machine complex's horizontal accelerations during startup. Figure 5 depicts the spectrogram magnitude. For clarity reasons only the frequency range 0 to 50 Hz is presented. The left part of the picture shows a surface plot presentation while the right part shows a 2D plot of the spectrogram. The frequency resolution is 1.953 Hz. A ridge representing the maximum value of the magnitude of the wavelet function at an appropriate scale (frequency) and translation (time index) can be clearly seen. Due to the startup, the amplitude of vibrations and the revolutions of the drum are increasing. The spectrogram and the ridge represent the magnitude of the coefficients of the Fourier transform at a given time index. The spectrogram magnitude is therefore directly dependent upon the amplitude of the vibrations. The increase in the amplitudes of vibrations manifests itself as the increasing magnitude of the ridge. The frequency of the ridge represents the instantaneous frequency with the highest power. Since this equals the rotating frequency of the drum, the ridge frequency represents the instantaneous rotation frequency of the drum. With the exception of the drum frequency, other frequencies do not have significant power. We must point out, however, that the magnitude is shown on a linear and not on a logarithmic scale. After 30 s the magnitude of the spectrogram vanishes. This is because after 30 s vibrations were no longer recorded and zeros were added into the signal. These zeros state that in the time period after 30 s, the amplitude of the vibrations is zero. The spectrogram therefore must be zero and this can be seen in the figures. Because $2^{15}=32768$ discrete points were used for calculating the spectrogram we were able to use the fast Fourier transform procedure which significantly reduced the calculation time. The 2D plot of the spectrogram is



transformaciji uporabili zelo sorodno Gaussovo okensko funkcijo in Gaborjevo valčno funkcijo.

Frekvenčno ločljivost smo skušali izboljšati tako, da smo širino vsake okenske funkcije povečali na 2048 diskretnih točk, in sicer tako, da smo za 512 diskretno točko dodali ničle. S tem smo izboljšali frekvenčno ločljivost iz 1,953 Hz pri 512 diskretnih točkah na 0,488 Hz pri 2048 diskretnih točkah. Frekvenčna ločljivost se je izboljšala za štirikrat. Slika 6 prikazuje ustreznou izračunano magnitudo spektrograma. Zaznati je izboljšanje jasnosti frekvenčne slike. Na tridimenzionalni sliki spektrograma je predvsem opazno enakomernejše naraščanje strmine grebena spektrograma. Na tlorisni projekciji se je zmanjšalo število kvadratastih struktur, ki jih vidimo na sliki 5 (tlorisna projekcija). Širina grebena se ni bistveno spremenila, kar je verjetno posledica nezmožnosti Gaussove okenske funkcije, da bistveno zmanjša pretakanje moči med sosednjimi frekvencami. Dodatno na širino grebena vpliva neustaljenost signala. Tudi na tej sliki vidimo, da so po 30 s magnitude spektrograma enake nič, kar je posledica dejstva, da smo v tem območju signalu dodali ničle.

Slika 7 prikazuje magnitudo skalograma horizontalnih pospeškov pralne grupe pralnega stroja pri zagonu. Skalogram je izračunan s frekvenčno ločljivostjo 1,953 Hz. Levi del slike prikazuje skalogram v prostoru, desni del pa tlorisno projekcijo. Na sliki lahko vidimo greben, katerega magnituda in frekvenca s časom naraščata. Tlorisna projekcija je zelo nejasna, tako da lahko zaznamo le zelo grob vzorec naraščanja frekvence. Slika 8 prikazuje magnitudo skalograma, izračunanega s štirikrat boljšo frekvenčno ločljivostjo (0,488 Hz). Tako izračunana frekvenčna slika je bistveno jasnejša. Magnituda in frekvenca zelo lepo vidnega grebena s časom naraščata. Greben predstavlja magnitudo valčnih funkcij določene skale (frekvence) in časovne premaknitve (časovni indeks). Greben je ozek, kar pomeni, da je odtekanje moči na sosednje frekvence majhno. Tudi na tlorisni projekciji skalograma je naraščanje frekvence lepo razvidno.

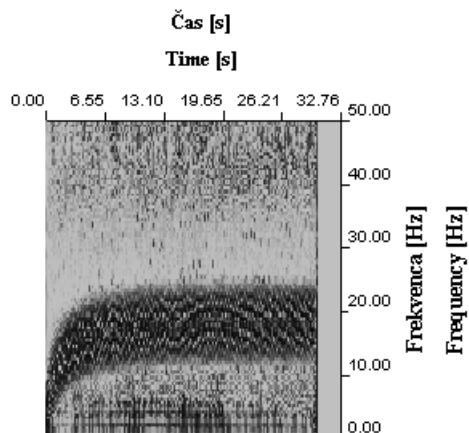


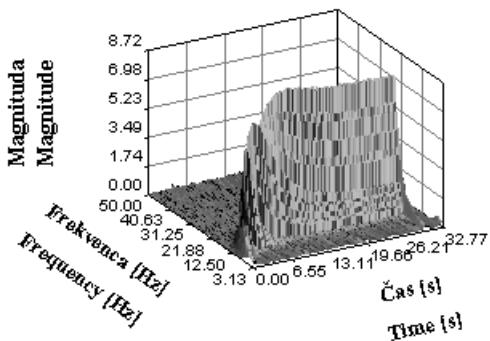
Sl. 6. Spektrogram, frekvenčna ločljivost 0,488 Hz
Fig. 6. The spectrogram, frequency resolution 0.488 Hz

very unclear, this can be attributed to the low frequency resolution and the Fourier transform basic functions (sine and cosine). The power leakage could be reduced with the selection of a better window function but that would make it harder to compare spectrograms with scalograms. In this study a comparable Gaussian window function and Gabor wavelet were used which enabled us to compare the calculated spectrograms and scalograms.

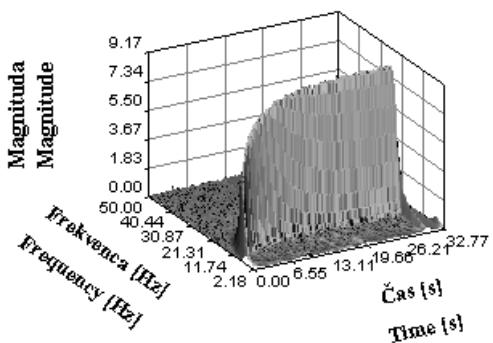
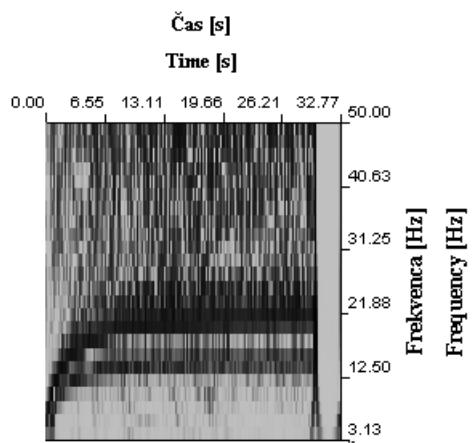
Next, we tried to improve the readability of the 2D plots of the spectrogram. We increased the frequency resolution by appending zeros to the length of each window function. The window length was increased to 2048 discrete points. The frequency resolution increased by a factor of 4 (from 1.953 to 0.488 Hz). Figure 6 depicts the corresponding spectrogram. On the surface plot the slope of the ridge is more regular than before. The clarity of the 2D projection also improved, however, the width of the ridge was not changed significantly. The width of the ridge is proportional to the power leakage and the probable explanation could be that the Gaussian window function does not sufficiently reduce the power leakage. Since after 30 s only zeros can be found in the signal, the magnitudes of the spectrogram in this region are equal to zero.

The scalogram magnitude of the washing-machine complex's horizontal accelerations during startup is shown in Figure 7. The left part of the picture shows a surface plot presentation while the right part shows a 2D plot of the scalogram. The scalogram is calculated with a frequency resolution of 1.953 Hz. Here again, the ridge with rising magnitude and frequency can be seen. The 2D projection is very unclear and only a coarse pattern of the frequency-time dependence can be observed. The scalogram magnitude with improved frequency resolution (0.488 Hz) is shown in Figure 8. The readability of the 2D projection has improved significantly. The magnitude and frequency of the ridge increase with time. The width of the ridge is small, suggesting small power

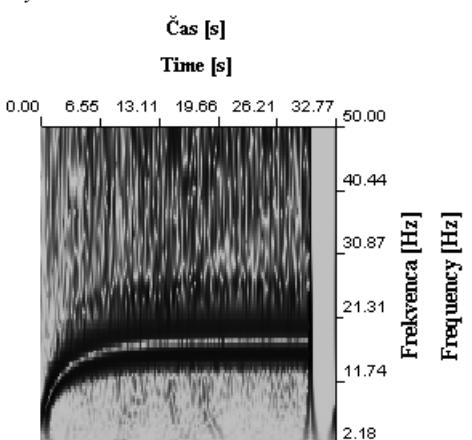




Sl. 7. Skalogram, frekvenčna ločljivost 1,953 Hz
Fig. 7. The scalogram, frequency resolution 1.953 Hz



Sl. 8. Skalogram, frekvenčna ločljivost 0,488 Hz
Fig. 8. The scalogram, frequency resolution 0.488 Hz



Prikazano je frekvenčno območje od 2 Hz do 50 Hz. Po 30 s ni več nihanja, zato je magnituda skalograma v tem območju enaka nič.

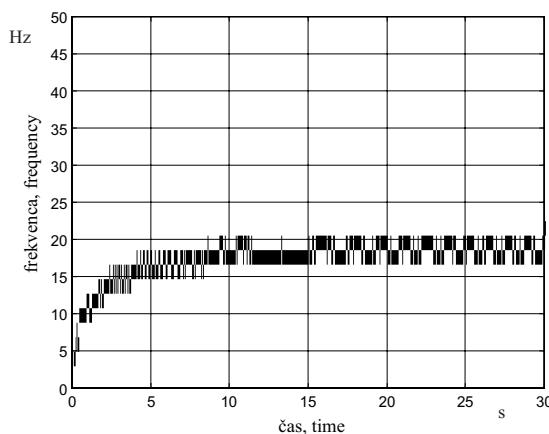
2.2 Primerjava grebenov spektrogramov in skalogramov

Na slikah 9 do 14 so prikazani grebeni spektrogramov in skalogramov horizontalnih pospeškov pralne grupe pralnega stroja. Na teh slikah so razlike med posameznimi načini izračuna frekvenčne vsebine še dodatno razvidne. Greben dobimo tako, da pri določenem časovnem indeksu prikažemo samo največje vrednosti magnitudo spektrograma oziroma skalograma. Iz grebena spektrograma s frekvenčno ločljivostjo 1,953 Hz je skoraj nemogoče izluščiti vrednost frekvence pri posameznem časovnem indeksu. Greben spektrograma s frekvenčno ločljivostjo 0,488 Hz predstavlja izboljšanje, vendar je še vedno neberljiv. Navkljub izboljšanju frekvenčne ločljivosti se širina grebena ni bistveno zmanjšala. V nasprotju s prvima dvema grebeni skalogramov natančneje prikaže spremjanje frekvence pri zagonu pralnega stroja.

leakage. The frequency range of the scalogram is 2 to 50 Hz. After 30 s there are no vibrations present, therefore the scalogram vanishes.

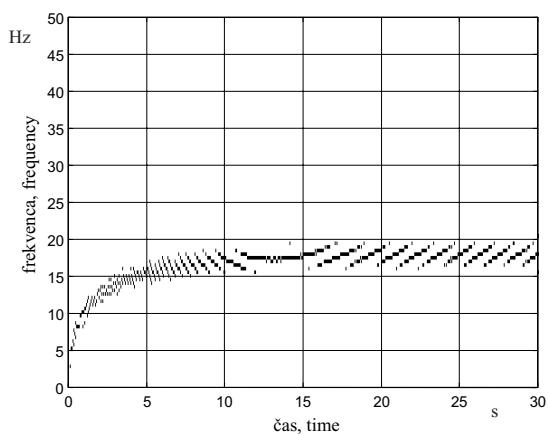
2.2 Comparison of the ridges of the spectrogram and scalogram

Figures 9 through 14 show spectrogram and scalogram ridges of the washing-machine complex's horizontal accelerations during startup. The differences between windowed Fourier and continuous wavelet analyses are here emphasized. The ridges are obtained when the maximum magnitude values of the spectrogram (scalogram) at a given time index are displayed. It is very difficult to determine the frequency-time dependence from the spectrogram ridge with a frequency resolution of 1.953 Hz. The spectrogram ridge with a frequency resolution of 0.488 Hz represents an improvement over the former ridge, but it is still difficult to read. In spite of the improved frequency resolution, the width of the ridge has not changed significantly. In contrast, the scalogram ridges are much more precise. The ridge scalogram, calculated with a frequency resolution of 0.488 Hz is



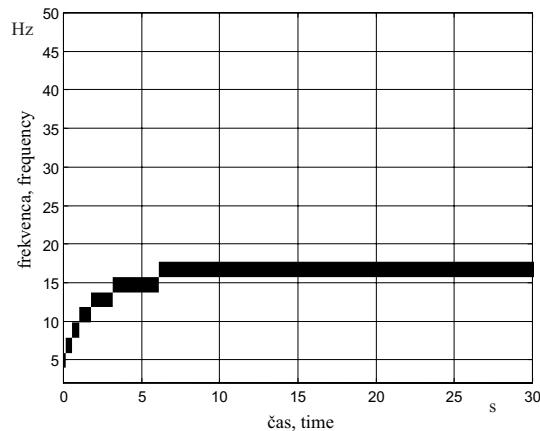
Sl. 9. Greben spektrograma, frekvenčna ločljivost 1,953 Hz

Fig. 9. The ridge of the spectrogram, frequency resolution 1.953 Hz



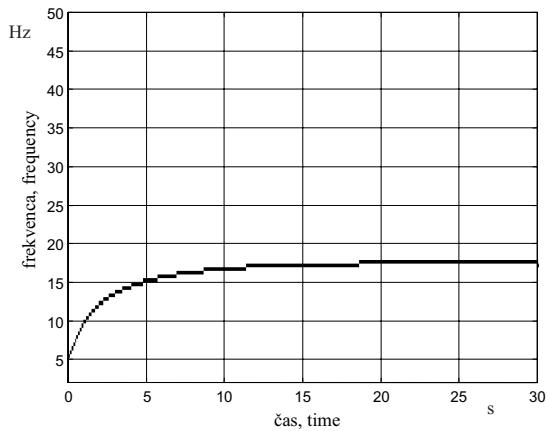
Sl. 10. Greben spektrograma, frekvenčna ločljivost 0,488 Hz

Fig. 10. The ridge of the spectrogram, frequency resolution 0.488 Hz



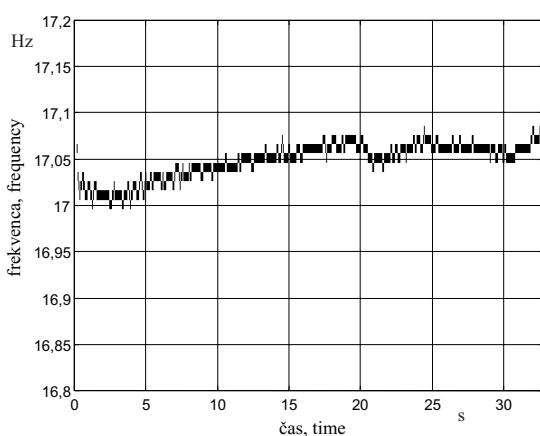
Sl. 11. Greben skalograma, frekvenčna ločljivost 1,953 Hz

Fig. 11. The ridge of the scalogram, frequency resolution 1.953 Hz



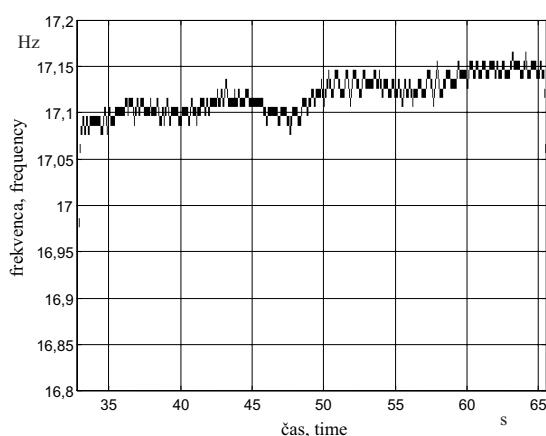
Sl. 12. Greben skalograma, frekvenčna ločljivost 0,488 Hz

Fig. 12. The ridge of the scalogram, frequency resolution 0.488 Hz



Sl. 13. Greben skalograma, ustaljeno stanje. Frekvenčna ločljivost 0,01 Hz

Fig. 13. The ridge of the scalogram, the stationary state. Frequency resolution 0.01 Hz



Sl. 14. Greben skalograma, ustaljeno stanje. Frekvenčna ločljivost 0,01 Hz

Fig. 14. The ridge of the scalogram, the stationary state. Frequency resolution 0.01 Hz

Natančnejši je skalogram, ki je izračunan pri frekvenčni ločljivosti 0,488 Hz. Frekvence na začetku ni mogoče zaznati iz dveh razlogov:

- Pri izračunu skalogramov smo se omejili na frekvenčno območje 2 do 50 Hz. Spremljanje frekvenčnega območja pod 2 Hz bi zahtevalo časovno bistveno daljše izračune.
- Pri izračunu grebena smo zanemarili vse vrednosti manjše od 1/20 največje vrednosti magnitude skalograma. Amplitude nihanja na začetku zagona so bile tako majhne, da so ustrezne vrednosti magnitude spektrograma padle pod postavljeni kriterij.

Frekvence vrtenja bobna, dobljene iz skalograma z boljšo frekvenčno ločljivostjo, so prikazane v preglednici 3. Frekvenčna ločljivost je 0,488 Hz. Po 12 s zagona se vrtilna frekvence spreminja manj kot 3%. Pri 30 s je vrtilna hitrost 17,304 Hz, kar se zelo dobro ujema z že znanimi rezultati ([18] do [21]), pri katerih je bila izračunana vrtilna frekvence ožemanja pri ustaljenem stanju 17,58 Hz.

2.3 Spreminjanje frekvence vrtenja bobna v ustaljenem stanju

Želeli smo tudi preveriti ustaljenost frekvence vrtenja bobna v ustaljenem stanju. Izračunali smo grebene skalogramov horizontalnih pospeškov pralne skupine v ustaljenem stanju. Pri merjenju pospeškov smo frekvenco vzorčenja povišali na 2000 Hz. Grebene smo izračunali s

the most precise of all the calculated ridges. At very small time indexes the ridges do not detect frequency for two reasons:

- Scalograms were calculated only in the frequency region of 2 to 50 Hz. Calculating scalograms at lower frequencies would be significantly more time consuming;
- When calculating ridges, all magnitudes lower than 1/20 of the maximum magnitude were ignored. The amplitude of the vibrations at the beginning of the startup fall below this criterion.

Drum-spin frequencies, extracted from the scalogram with a frequency resolution of 0.488 Hz, are presented in Table 3. After 12 s the frequency changes less than 3%. At 30 s the frequency is 17.304 Hz, which matches with previous studies ([18] to [21]). In these studies the dry spin frequency in the steady state was determined to be 17.58 Hz.

2.3 Spin frequency variation in the stationary state

The steadiness of the spin frequency in the steady state was checked. Scalogram ridges of the washing-machine complex's horizontal accelerations in the steady state were calculated. The signal of the horizontal accelerations was sampled with a higher sampling frequency, $f_s=2000$ [Hz]. Ridges were calculated with a

Preglednica 3. Spreminjanje trenutne frekvence pri zagonu pralnega stroja. Vrednosti grebena skalograma horizontalnih pospeškov. Frekvenčna ločljivost 0,488 Hz

Tabel 3. The instantaneous frequency during a washing-machine startup. Values of the scalogram ridges of the horizontal accelerations. Frequency resolution 0.488 Hz

čas v s time in s	1	2	4	6	8	10	12	14
frekvenca v Hz frequency in Hz	9,496	12,424	14,376	15,840	16,328	16,816	17,304	17,304

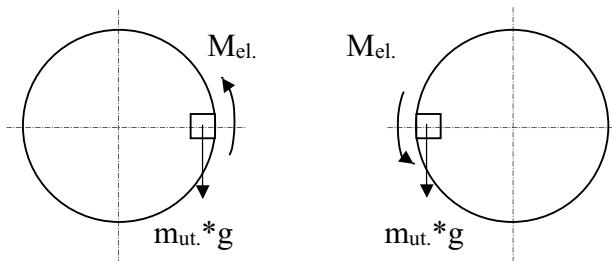
čas v s time in s	16	18	20	22	24	26	28	30
frekvenca v Hz frequency in Hz	17,304	17,304	17,304	17,304	17,304	17,304	17,792	17,304

Preglednica 4. Podatki o parametrih izračuna grebenov skalogramov

Tabel 4. Ridge scalogram calculation data

valček wavelet	gabor
S_{\min}	2
σ	1,5
spodnja meja računanega frekvenčnega območja lower frequency bound	16 Hz
zgornja meja računanega frekvenčnega območja higher frequency bound	18,18 Hz
frekvenčna ločljivost frequency resolution	0,01 Hz

frekvenčno ločljivostjo 0,01 Hz. Podatki o izračunu grebenov skalogramov so podani v preglednici 4. Slika 13 prikazuje greben v časovnem območju 0 do 32,7675 s, slika 14 pa greben v časovnem območju 32,760 do 65,5355 s. Opazimo lahko, da frekvence vrtenja bobna ni konstantna, temveč s časom počasi narašča. Pogonski elektromotor še naprej pospešuje vrtenje bobna. Z večanjem vrtilne frekvence se moment elektromotorja manjša. Posledično se zvečuje vrtilna frekvence bobna vedno počasneje. Spreminjanja vrtilne frekvence bobna znotraj enega vrtljaja ni mogoče zaznati. To je v nasprotju s pričakovanji, saj se moment pospeševanja bobna znotraj enega vrtljaja spreminja (sl. 15).



Sl. 15. Vpliv lege uteži na moment pospeševanja bobna pralnega stroja

Fig. 15. The influence of the weight position on the washing-machine drum acceleration moment

3 SKLEP

V strojništvu pogosto želimo spremljati frekvenčno vsebino določenega procesa. Največkrat uporabljena metoda je izračun magnitude Fourierjeve transformacije. Zaradi svojih lastnosti je Fourierjeva transformacija primerna predvsem za spremljanje ustaljenih procesov. Pogosto pa se srečujemo tudi s neustaljenimi procesi. V teh primerih lahko spremljamo frekvenčno vsebino z uporabo integralnih transformacij, primernih za neustaljene procese. Med te transformacije štejemo okensko Fourierjevo transformacijo, Wigner-Villejevo porazdelitev, modificirane Wigner-Villejeve porazdelitve, valčno transformacijo. V tem prispevku sta prikazani okenska Fourierjeva in zvezna valčna transformacija. Njune zmožnosti spremljanja frekvenčnega vsebine neustaljenega procesa smo ugotovljali pri primeru zagona pralnega stroja.

Okenska Fourierjeva transformacija je omogočila grobo spremljanje frekvenčne vsebine. Odtekanje moči na sosednje frekvence je tako veliko, da so izračunani spektrogrami zelo nejasni. Izboljšanje frekvenčne ločljivosti z dodajanjem ničel v signal sicer izboljša jasnost, vendar je kakovost izračunane frekvenčne vsebine slabša kakor pri zvezni valčni transformaciji, izračunani z isto frekvenčno ločljivostjo. To je še posebej razvidno iz izračunanih grebenov, pri katerih spremljamo časovno spreminjanje vrtilne frekvence bobna pralnega stroja. Grebeni magnitude spektrogramov so zelo široki, posledično pa lahko

frequency resolution of 0.01 Hz. Details of the calculations are given in Table 4. The scalogram ridge for the time period 0 to 32.7675 s is presented in Figure 13, while the scalogram ridge for the time period 32.760 to 65.5355 s is presented in Figure 14. It is evident that the spin frequency is not constant. The driving electromotor slightly accelerates the spinning of the drum and with increasing spin frequency the driving moment of the electromotor decreases. As a consequence, the spin frequency of the drum increases ever more slowly. Within one revolution the change in drum spin frequency cannot be detected. Because the driving moment, acting on the drum, depends on the instantaneous angle of the drum, we expected that the spin frequency within one revolution would not be constant.

3 CONCLUSION

In mechanical engineering we often want to monitor the frequency content of a certain process. The most widely used method for monitoring frequency content is calculating magnitudes of the Fourier transform. However, due to the type of basic functions, the Fourier transform is only appropriate for stationary processes. Monitoring the frequency content of non-stationary processes requires the use of different methods. The windowed Fourier transform, the Wigner-Ville distribution, modified Wigner-Ville distributions and the wavelet transform are among methods that are appropriate for analyzing non-stationary processes. This paper deals with the windowed Fourier transform and the continuous wavelet transform. Their abilities for monitoring the frequency content of non-stationary process were studied for the case of a washing-machine startup.

Using the windowed Fourier transform we were only able to roughly determine the frequency content. The amount of power leakage resulted in very unclear spectrograms. Increasing the frequency resolution with zero padding did not significantly improve the readability of the spectrograms. On the other hand, scalograms calculated at the same frequency resolution as spectrograms offer better readability of the frequency content. This can also be seen in the figures of the ridges, which are used for determination of frequency-time dependence. The width of the spectrogram ridges is wide and the drum-spin frequency in the steady state

ugotovimo samo, da je vrtilna frekvenca bobna v ustaljenem stanju med 20,5 in 17 Hz. Z uporabo grebenov magnitude skalogramov lahko to napoved bistveno izboljšamo. Ugotovili smo, da je vrtilna frekvenca bobna v ustaljenem stanju 17,304 Hz. Preverili smo tudi samo ustaljeno stanje. Horizontalne pospeške pralne grupe v ustaljenem stanju smo ponovno pomerili, pri čemer smo uporabili višjo frekvenco vzorčenja. Grebene magnitud skalogramov ustaljenega stanja smo izračunali z bistveno boljšo frekvenčno ločljivostjo -0,01 Hz. Ugotovili smo, da se vrtilna frekvenca bobna ne ustali, temveč se s časom počasi zvečuje. Znotraj enega vrtljaja nismo zaznali spreminjaanja vrtilne frekvence bobna.

Zahvala

Avtorji se zahvaljujemo Ministrstvu za šolstvo, znanost in šport za finančno podporo, ki jo dobivamo po pogodbi st.. S24-782-007/19910/99.

4 UPORABLJENE OZNAKE 4 USED SYMBOLS

koeficient	a_k	coefficient
koeficient	b_k	coefficient
koeficient	C_ψ	coefficient
frekvenca v Hz	f	frequency in Hz
funkcija v časovnem območju	$f(t)$	function in time domain
Fourierjeva integralska transformacija funkcije f	$\hat{f}(\omega)$	Fourier integral transform of $f(t)$ function
$f(k \cdot \Delta t)$	f_k	$f(k \cdot \Delta t)$
največja frekvenca v Hz	f_{\max}	maximum frequency in Hz
frekvenca vzorčenja v Hz	f_s	sampling frequency in Hz
okenska funkcija	$g_u(t) = g(t-u)$	window function
$\sqrt{-1}$	i	$\sqrt{-1}$
koeficient	k	coefficient
število diskretnih točk v signalu	N	number of discrete points in the signal
skala	S	scale
okenska Fourierjeva transformacija	$Sf(u, \omega)$	windowed Fourier transform
čas v s	t	time in s
perioda v s	T	period in s
parameter premika v s	u	time delay in s
Gaussova okenska funkcija	w_{Gauss}	Gaussian window function
valčna transformacija	$Wf(u, s)$	wavelet transform
časovni inkrement v s	Δt	time increment in s
koeficient	η	coefficient
koeficient	σ	coefficient
valčna funkcija v časovnem območju	$\psi(t)$	wavelet function in time domain
skalirana in translirana valčna funkcija	$\psi_{u,s}(t)$	scaled and translated wavelet function
Gaborjev valček v časovni domeni	ψ_{Gabor}	Gabor wavelet in time domain
Fourierjeva integralska transformacija $\psi(t)$	$\hat{\psi}(\omega)$	Fourier integral transform of $\psi(t)$
Fourierjeva integralska transformacija $\psi_{u,s}(t)$	$\hat{\psi}_{u,s}(\omega)$	Fourier integral transform of $\psi_{u,s}(t)$
Fourierjeva integralska transformacija ψ_{Gabor}	$\hat{\psi}_{Gabor}$	Fourier integral transform of ψ_{Gabor}
vektor diskretiziranega valčka	$\overline{\psi}_{k,s}$	discretized wavelet vector
frekvenca v rad/s	ω	frequency in rad/s
kompleksna konjugacija	$*$	complex conjugation
konvolucija	\otimes	convolution

can only be placed in the interval 17 to 20.5 Hz. This estimation of the drum spin frequency in the steady state can be improved on by using scalogram ridges, these ridges reveal that the drum spin frequency in the steady state is 17.304 Hz. In the next step the steady state itself was scrutinized. The washing-machine complex's horizontal accelerations in the steady state were measured using a higher sampling rate. The scalogram ridges were then calculated with a frequency resolution of 0.01 Hz. We determined that the drum spin frequency is not constant, but slowly increases with time. Within one revolution no variations in drum spin frequency could be observed.

Acknowledgement

The authors acknowledge the financial support of the Slovenian Ministry of Education, Science and Sport, contract No. S24-782-007/19910/99.

5 LITERATURA
5 REFERENCES

- [1] Gabor, D. (1964) Theory of communications. *JIEE*.
- [2] Grossman, A., J. Morlet (1984) Decomposition of Hardy function into square integrable wavelets of constant shape. *SIAM Journal of Mathematical Analysis and Applications*, Vol. 15, No. 4, 723-736.
- [3] Boulahbal, D., M. Farid, F. Ismail (1999) Amplitude and phase wavelet maps for detection of cracks in geared systems. *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 13, No. 3, 423-436.
- [4] Lin, S.T., P. D. McFadden (1997) Gear vibration analysis by b-spline wavelet-based linear wavelet transform. *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 11, No. 4, 603-609.
- [5] Liu, B., S.-F. Ling (1999) On the selection of informative wavelets for machinery diagnosis. *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 13, No. 1, 145-162.
- [6] Paya, B.A., I. I. Esat (1997) Artificial neural network based fault diagnostic of rotating machinery using wavelet transforms as a preprocessor. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 1997, Vol. 11, No. 5, 751-765.
- [7] Staszewski, W.J., S. Gareth Pierce, K. Worden, Wayne R. Philip, Geoffrey R. Tomlinson, B. Culshaw (1997) Wavelet signal processing for enhanced Lamb-wave defect detection in composite plates using optical fiber detection. *Optical Engineering*, Vol. 36, No. 7, 1877-1888.
- [8] Staszewski, W.J. (1997) Identification of damping in mdof systems using time-scale decomposition. *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 203, No. 2, 283-305.
- [9] Staszewski, W.J. (1998) Identification of non-linear systems using multi-scale ridges and skeletons of the wavelet transform. *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 214, No. 4, 639-658.
- [10] Ghanem, R., Romeo, F. (2000) A wavelet-based approach for the identification of linear time-varying dynamical systems. *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 234, No. 4, 555-576.
- [11] Lamarque, C.-H., S. Pernot, A. Cuer (2000) Damping identification in multi-degree-of-freedom systems via a wavelet-logarithmic decrement-part 1:theory. *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 235, No. 3, 361-374.
- [12] Hans, S., E. Ibraim, S. Pernot, C. Boutin, C.-H. Lamarque (2000) Damping identification in multi-degree-of-freedom systems via a wavelet-logarithmic decrement-part 2:study of a civil engineering building. *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 235, No. 3, 375-403.
- [13] Staszewski, W.J., J. Giacomin (1997) Application of the wavelet based ffds to the analysis of nonstationary vehicle data. *Proceedings of the 15th International Modal Analysis Conference-IMAC*, Vol. 1, No. 4, 425-431.
- [14] Basu, B., V. K. Gupta (1999) Wavelet-based analysis of the non-stationary response of a slipping foundation. *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 222, No. 4, 547-563.
- [15] Basu, B., V. K. Gupta (1999) On equivalent linearization using wavelet transform. *Journal of Vibration and Acoustics*, Vol. 121, 429-432.
- [16] Berger, B.S., I. Minis, J. Harley, M. Rokni, M. Papadopoulos (1998) Wavelet based cutting state identification. *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 213, No. 5, 813-827.
- [17] Mallat, S. (1999) A wavelet tour of signal processing. *Academic Press*, 2nd Edition.
- [18] Jakšić, N. (1997) Analiza nihanja nelinearnega centrifugalno vzbujanega ravninskega sistema, *Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo*, magistrsko delo.
- [19] Simonovski, I. (1998) Uporaba spektrov tretjega reda pri analizi nelinearnih mehanskih nihanj. *Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo*, magistrsko delo.
- [20] Jakšić, N., M. Boltežar, I. Simonovski, A. Kuhelj (1999) Dynamical behaviour of the planar non-linear mechanical system - Part I: Theoretical Modelling. *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 226, No. 5, 923-940.
- [21] Boltežar, M., N. Jakšić, I. Simonovski, A. Kuhelj (1999) Dynamical behaviour of the planar non-linear mechanical system - Part II: Experiment. *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 226, No. 5, 941-953.

Naslov avtorjev: mag. Igor Simonovski
doc.dr. Miha Boltežar
Fakulteta za strojništvo
Univerze v Ljubljani
Aškerčeva 6
1000 Ljubljana

Authors' Address: Mag. Igor Simonovski
Doc.Dr. Miha Boltežar
Faculty of Mechanical Eng.
University of Ljubljana
Aškerčeva 6
1000 Ljubljana, Slovenia

Prejeto:
Received: 18.12.2000

Sprejeto:
Accepted: 12.4.2001

Analiza temperatur in toplotne energije pri odrezavanju

An Analysis of Temperatures and Thermal Energy during Cutting

Matjaž Milfelner - Franci Čuš

V predstavljenem prispevku je opisana analiza temperatur in energij, ki se pojavijo med postopkom odrezavanja. Vpliv temperature na rezalno ploskev in rob rezalne ploščice je zelo pomemben, ker povzroči obrabo cepilne ploskve in rezalnega roba orodja, s tem pa se zmanjša obstojnost orodja. V zadnjem delu prispevka je prikazan primer simuliranja porazdelitve temperature na rezальнem robu orodja pri spremembah rezalne hitrosti in geometrije orodja.

© 2001 Strojniški vestnik. Vse pravice pridržane.

(Ključne besede: temperature, energije toplotne, ploskve strižne, ploskve cepilne)

This paper describes an analysis of the temperatures and energies which occur during the cutting process. The influence of the temperature on the cutting face and the cutting insert edge is very important since it causes wear of the tool face and of the tool cutting edge and thus the tool's resistance to wear is reduced. The final part of the paper shows an example of a simulation of the isothermal lines on the tool cutting edge for the case of a change of cutting speed and a change of the tool geometry.

© 2001 Journal of Mechanical Engineering. All rights reserved.

(Keywords: temperature, thermal energy, shear plane, tool face)

0 UVOD

Pri obdelavi materiala z odrezavanjem je pomembnih več temperatur. Med te temperature prištevamo temperaturo v strižni ravnini θ_s , ki vpliva na potek napetosti v strižni ravnini in temperaturi na cepilni ploskvi θ_t in prosti ploskvi θ_r rezalne ploščice. Temperatura na cepilni ploskvi θ_t povzroča obrabo na cepilni ploskvi v obliki kotanje, temperatura na prosti ploskvi θ_r pa obrabo proste ploskve.

1 TOPLOTNE RAZMERE PRI ODREZAVANJU

Pri procesu odrezavanja oziroma tvorbi odrezka nastala mehanska energija se spreminja v toplotno energijo. Vir toplotne pri odrezovanju z ostrim rezalnim robom rezalne ploščice razdelimo v dve področji: (slika 1a)

- prvo z virom v strižni ravnini (1) in
- drugo z virom na cepilni ploskvi (2).

Po prvih ugotovitvah o spremembah energije pri procesu odrezavanja lahko predpostavimo da: [1] (slika 1b)

0 INTRODUCTION

During machining several temperatures are important: the temperature in the shear plane θ_s , which influences the distribution of stresses in the shear plane; the temperature on the tool face θ_t ; and the temperature on the free face θ_r of the cutting insert. The temperature on the tool face θ_t causes wear on the tool face in the form of a crater, whereas the temperature on the free face θ_r causes wear of the free face.

1 THERMAL CONDITIONS DURING CUTTING

The mechanical energy produced during the cutting process and/or chip formation is transformed into thermal energy. The heat source during cutting with the sharp cutting edge of a cutting insert comprises two areas: (Figure 1a)

- the area with the source in the shear plane (1);
- the area with the source on the tool face (2).

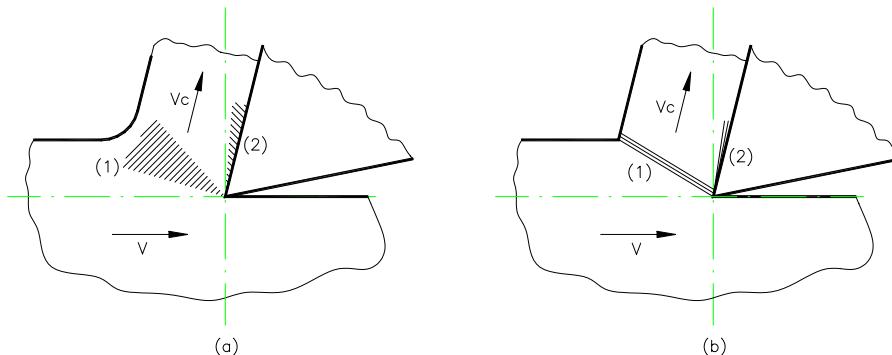
On the basis of the first findings about the transformation of energy during the cutting process it is possible to assume that: [1] (Figure 1b)

- se vsa energija, ki nastane v točki (1 – strižna ravnina) in (2 – cepilna ploskev) spremeni v toplotno energijo,
- energija iz točke 1 in 2 se usmeri na cepilno in prosto ploskev in
- energija je v točkah 1 in 2 enakomerno porazdeljena.

Tudi z uporabo teh predpostavk je določitev glavnih temperatur, to je temperature na cepilni in prosti ploski rezalne ploščice, zelo zahtevna. To je predvsem zato, ker se del energije iz točke 1 odvede v odrezek vzdolž cepilne ploskve, drugi del pa v proces. Prav tako se en del energije iz točke 2 odvede v odrezek, drugi del pa v orodje.

Zaradi tega določimo dva razdelitvena koeficiente R_1 in R_2 :

- koeficient R_1 je del energije iz strižne ravnine – točka 1, ki gre v odrezek,
- koeficient R_2 pa je del energije na cepilni ploskvi – točka 2, ki gre v odrezek.



Sl. 1. Toplotne razmere pri pravokotnem odrezavanju
Fig. 1 Thermal conditions during orthogonal cutting

Četrta predpostavka pri analizi postopka odrezavanja je, da se toplotna energija, ki nastane pri nastanku odrezka, ne izgublja v okolico. To pomeni, da je energija na enoto prostornine, ki preide v odrezek v strižni ravnini (1) enaka:

$$U_{C1} = R_1 \cdot u_s \quad (1)$$

in energija na enoto prostornine, ki preide v odrezek na cepilni ploskvi (2) enaka:

$$U_{C2} = R_2 \cdot u_F \quad (2),$$

pri čemer sta u_s in u_F specifični energiji pri strigu in trenju.

2 ANALIZA TEMPERATUR IN TOPLOTE

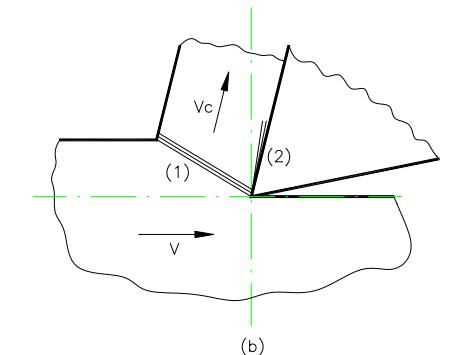
Z uporabo dimenzijske analize lahko določimo temperature pri procesu odrezavanja za praktično uporabo. Prvi, ki je uporabil dimenzijsko analizo za rešitev problema temperature na cepilni

- all energy occurring at points 1 (shear plane) and 2 (tool face) is transformed into thermal energy;
- the energy from points 1 and 2 is directed onto the tool face and the free face;
- the energy at points 1 and 2 is uniformly distributed.

Even with these assumptions the determination of the main temperatures, i. e. the temperatures on the tool face and on the free face of the cutting insert, is very demanding because some of the energy from point 1 moves to the chip along the tool face and the rest to the process. Also a part of the energy from (2) is conveyed to the chip and the other to the tool.

As a result, two partition coefficients, R_1 and R_2 , need to be defined:

- coefficient R_1 is the fraction of the energy from the shear plane - point 1 - which goes to the chip;
- coefficient R_2 is the fraction of the energy on the tool face - point 2 - going to the chip.



The fourth assumption in the analysis of the cutting process is that the thermal energy generated during chip formation is not lost to the environment. This means that the energy per unit volume going to the chip in the shear plane (point 1) is equal to:

and that the energy per unit volume going to the chip on the tool face (point 2) is equal to:

where u_s and u_F are specific energies in the shear and the friction.

2 AN ANALYSIS OF TEMPERATURE AND HEAT

By means of dimensional analysis it is possible to determine the temperatures in the cutting process for a practical application. Kronenberg [2] was the first to apply dimensional analysis to solve

ploskvi rezalne ploščice, je bil Kronenberg [2]. Na podlagi svojega širokega znanja in izkušenj je utemeljil, da velikost povprečne temperature na cepilni ploskvi rezalne ploščice θ_T lahko opišemo z enačbo, če vanjo vključimo spremenljivke, zapisane v preglednici 1.

Preglednica 1. Kronenbergove veličine za dimenzijsko analizo
Table 1. Kronenberg's quantities for dimensional analysis

Veličina Quantity	Simbol Symbol	Enota Unit
povprečna temperatura na cepilni ploskvi mean tool-face temperature	θ_T	K
rezalna hitrost cutting speed	V	m/min
nedeformirani prerez odrezka undeformed-chip area	A	mm ²
specifična rezalna sila specific cutting energy	k_c	MPa
toplota prevodnost thermal conductivity	k	W/mK
specifična prostorninska toplota volume specific heat	ρC	J/m ³ K

V preglednici 1 imamo štiri dimenzijsko neodvisne veličine V, k_c, k in ρC . Te štiri dimenzijsko neodvisne veličine lahko povežemo v enačbo v kombinaciji z eno od preostalih dveh nedimenzijskih veličin θ_T in A . Ti dve veličini sta dobljeni na podlagi načela o dimenzijski homogenosti. Iz te dimenzijske enačbe dobimo enačbo za povprečno temperaturo na cepilni ploskvi orodja:

$$\frac{\theta_T \cdot (\rho \cdot C)}{k_c} = f\left(\frac{A \cdot V^2 \cdot (\rho \cdot C)^2}{k^2}\right) \quad (3).$$

Vrednosti za vse te veličine dobimo pri Gottwein-u [3]. Razmerje med obema stranema enačbe je prikazano v diagramu na sliki 2. Os X predstavlja desni del enačbe, os Y pa levi del enačbe. Če je dimenzijska analiza pravilna, potem je krivulja v diagramu premica. Enačbo (3) izboljšamo tako, da veličino $A=b \cdot t$ - nedeformiran prerez odrezka nadomestimo s t - nedeformirano debelino odrezka, ker ima b - nedeformirana širina odrezka zanemarljiv vpliv na θ_T , medtem ko ima t zelo velik vpliv.

Naslednja izboljšava je v tem, da upoštevamo količnik $k/\rho C$ kot eno spremenljivko namesto dveh posameznih spremenljivk k in ρC . Vse ostale Kronenbergove spremenljivke so bile dobro izbrane.

V preglednici 2 so prikazane izboljšane veličine, ki vodijo do enojne nedimenzijske veličine in iz tega izhaja, da je povprečna temperatura na cepilni ploskvi rezalne ploščice:

$$\theta_T \approx u \cdot \left[\frac{V \cdot t}{k / \rho \cdot C} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4).$$

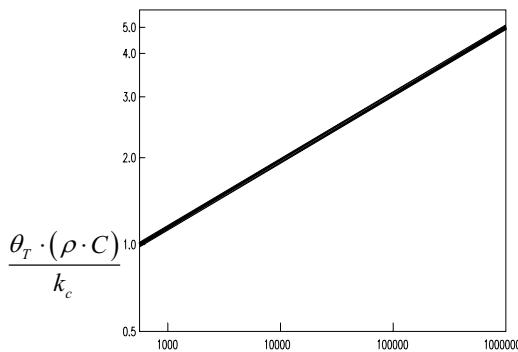
the problem of the temperature on the tool face of the cutting insert. On the basis of his knowledge and experience he postulated that the mean temperature on the tool face of the cutting insert θ_T can be described by an equation which use the quantities listed in table 1.

Table 1 lists four dimensionally independent quantities i. e. V, k_c, k and ρC . They can be combined in an equation with one of the other two non-dimensional quantities θ_T and A . These two quantities are obtained on the basis of the principle of dimensional homogeneity. From this dimensional equation the equation for the mean temperature on the tool face is obtained:

The data on all these quantities are available from Gottwein [3]. The relation between both sides of the equation is shown in the diagram in figure 2. The X-axis represents the right-hand side of the equation and the Y-axis represents the left-hand side of the equation. If the dimensional analysis is correct, the curve in the diagram is a straight line. Equation 3 is improved by replacing $A=b \cdot t$ of the undeformed chip area, by t , the undeformed chip thickness, because the undeformed chip width b has a negligible influence on θ_T , whereas t has an appreciable influence.

The situation is further improved by considering the quotient $k/\rho C$ rather than the individual quantities k and ρC . All the other Kronenberg variables were correctly selected.

Table 2 shows the improved quantities leading to a single non-dimensional quantity and using this we can calculate that the mean temperature on the tool face of the cutting insert:



$$\frac{A \cdot V^2 \cdot (\rho \cdot C)^2}{k^2}$$

Sl. 2. Gottweinov diagram
Fig. 2. Gottwein's diagram

Preglednica 2. Izboljšane Kronenbergove veličine za dimenzijsko analizo
Table 2. Improved Kronenberg quantities for the dimensional analysis

Veličina Quantity	Simbol Symbol	Enota Unit
povprečna temperatura na cepilni ploskvi mean tool-face temperature	θ_T	K
rezalna hitrost cutting speed	V	m/min
nedeformirana debelina odrezka undeformed chip area	t	mm
specifična rezalna hitrost specific cutting energy	u	J
temperaturna difuzivnost temperature diffusivity	$k/\rho C$	m^2/s

Na prvi pogled enačba (4) prikazuje, da sta V in t enako pomembna glede na θ_T . To lahko prikažemo z drugo enačbo, v kateri določimo temperaturo v odvisnosti od rezalne hitrosti V in nedeformirane debeline odrezka t iz eksperimentalnih vrednosti:

$$\theta_T \approx V^{0.5} \cdot t^{0.3} \quad (5)$$

Povprečno temperaturo v strižni ravnini določimo na temelju privzetega modela, ki sloni na Piispanenovem modelu nastanka odrezka. Pri procesu nastanka odrezka se lastnosti v strižni ravnini spremenljajo, zato lahko strižno ravnino opišemo kot gibljivi toplotni vir. Povprečno temperaturo v strižni ravnini določimo z enačbo [4]:

$$\theta_s = 0,754 \cdot R_l \cdot u_s \cdot \sqrt{\frac{V \cdot t / \gamma}{(k / \rho \cdot C)}} + \theta_0 \quad (6)$$

pri čemer so: V - rezalna hitrost, t - nedeformirana debelina odrezka, γ - strižna deformacija, ρC -

At first glance equation 4 suggests that V and t are equally important with respect to θ_T . However, θ_T can be represented by another equation in which the temperature is determined in terms of the cutting speed V and the undeformed chip thickness t from experimental values:

The mean temperature in the shear plane is determined on the basis of the adopted model based on Piispanen's model of chip formation. During the process of chip formation the properties in the shear plane change, so the shear plane can be described as a mobile heat source. The mean temperature in the shear plane is determined by equation [4]:

$$\theta_s = 0,754 \cdot R_l \cdot u_s \cdot \sqrt{\frac{V \cdot t / \gamma}{(k / \rho \cdot C)}} + \theta_0 \quad (6)$$

where V is the cutting speed, t is the undeformed chip thickness, γ is the shear deformation, ρC is the

specifična prostorninska toplota in k - toplotna prevodnost. Koeficient R_1 določimo iz enačbe:

$$R_1 = \frac{1}{1 + 1,328 \sqrt{\left[\frac{k_1 \cdot \gamma}{V \cdot t} \right]}} \quad (7)$$

Specifično strižno energijo u_s izračunamo po enačbi [5]:

$$u_s = \frac{F_s \cdot V_s}{V \cdot t \cdot b \cdot \csc(\Phi) \cdot \sin(\Phi)} \quad (8)$$

V enačbi (8) je F_s - sila vzdolž strižne ravnine, V_s - strižna hitrost, b - nedeformirana širina odrezka in Φ - strižni kot.

Enačbo za povprečno temperaturo v strižni ravnini lahko zapišemo tudi v obliki:

$$\theta_s \cong 0,754 \cdot u_s \cdot \sqrt{\frac{V_s \cdot l_s}{(k/\rho \cdot C)}} + \theta_0 \quad (9)$$

Dolžina strižne cone $l_s = t/\sin(\Phi)$.

Razlika temperature v strižni coni $\Delta\theta_s$ je:

specific volume heat and k is the heat conductivity. The coefficient R_1 is determined from the equation:

The specific shear energy u_s is calculated according to equation [5]:

where F_s is the force along the shear plane, V_s is the shear speed, b is the undeformed chip width and Φ is the shear angle.

The equation for the mean temperature in the shear plane can also be written as follows:

$$\Delta\theta_s \cong u_s \cdot \sqrt{\frac{V_s \cdot l_s}{(k/\rho \cdot C)}} \quad (10)$$

Povprečno zvišanje temperature na površini odrezka zaradi trenja določimo po enačbi:

$$\Delta\theta_F \cong u_F \cdot \sqrt{\frac{V_c \cdot a}{(k/\rho \cdot C)}} \quad (11)$$

kjer je a dolžina stika med orodjem in odrezkom. Specifično energijo trenja u_F odrezka ob cepilno ploskev izračunamo po enačbi (6):

$$u_F = \frac{F_c \cdot V_c}{V \cdot t \cdot b} \quad (12)$$

pri čemer sta F_c - strižna sila in V_c - hitrost odrezka.

Povprečno zvišanje temperature na cepilni ploskvi je vsota temperature v strižni ravnini in temperature zaradi trenja:

where F_c is the shear force and V_c is the chip speed.

The mean temperature increase on the tool face is the sum of temperature in the shear plane and the temperature due to friction:

$$\Delta\theta_T \cong \theta_s + \Delta\theta_F \quad (13)$$

Prav tako je specifična rezalna energija vsota specifične strižne energije in specifične energije trenja:

In addition, the specific cutting energy is the sum of the specific shear energy and specific energy of friction:

$$u \cong u_s + u_F \quad (14)$$

Na koncu lahko iz rezultata dimenzijske analize definiramo, da je povprečna temperatura na cepilni ploskvi:

$$\theta_T \cong u \cdot \sqrt{\left[\frac{V \cdot T}{k/\rho \cdot C} \right]} + \theta_0 \quad (15)$$

In the end it is possible to define, on the basis of the result of the dimensional analysis, the mean temperature on the tool face to be:

3 PRIKAZ TEMPERATURE NA REZALNEM ROBU

V prikazanem primeru je predstavljen potek temperature na konici rezalne ploščice [7]. Simuliranje je izvedeno na podlagi metode končnih elementov in prikazuje izotermo porazdelitev temperature na rezальнem robu, odrezku in obdelovancu.

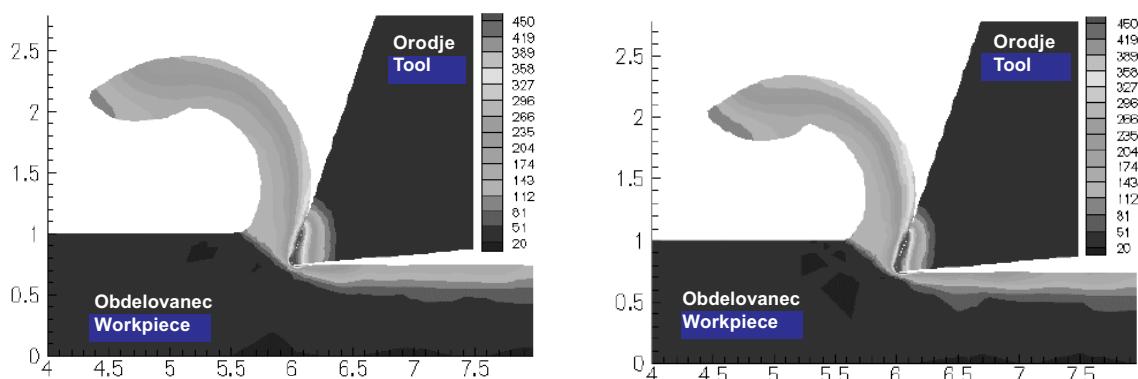
Prvi primer prikazuje porazdelitev temperature pri spremembji rezalne hitrosti. Parametri odrezavanja so prikazani v naslednji preglednici:

rezalna hitrost cutting speed	914, 1220	m/min
rezalna sila cutting force	935, 956	N
podajanje feed	0,254	mm/vrt
globina reza depth of cut	6,35	mm
cepilni kot rake angle	20	°
radij rezalnega roba cutting-edge radius	0,025	mm
material orodja tool-insert material	karbidna trdina tungsten carbide	
material obdelovanca workpiece material	AL6061-T6	

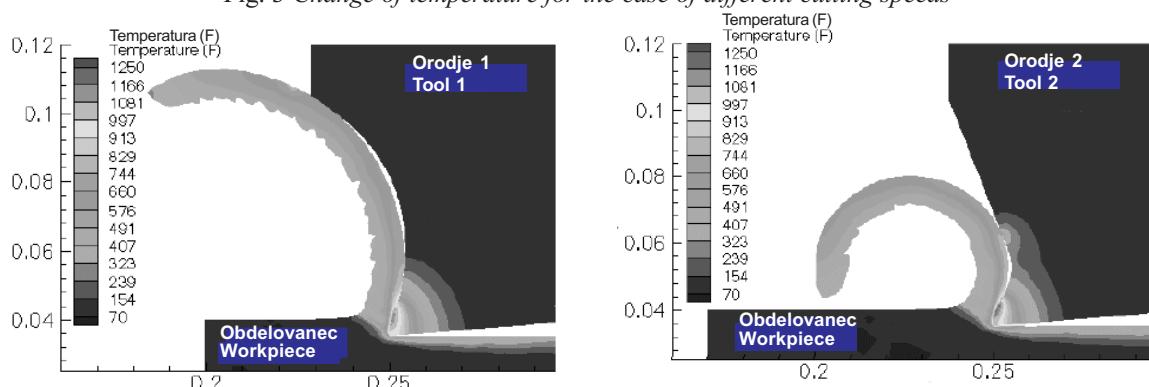
3 REPRESENTATION OF TEMPERATURE ON THE CUTTING EDGE

The example shows the areas of temperature on the cutting insert tip [7]. The simulation is made on the basis of the finite element method (FEM) and shows the isothermal lines of temperature on the cutting edge, chip and workpiece.

The first example shows the isothermal lines of temperature for the case of a change of cutting speed. The cutting parameters are shown in the following table:



Sl. 3. Sprememba temperature pri različnih rezalnih hitrostih
Fig. 3 Change of temperature for the case of different cutting speeds



Sl. 4. Sprememba temperature pri različni obliki rezalnega roba
Fig. 4. Change of temperature for the case of a different cutting-edge shape

V drugem primeru je prikazana porazdelitev temperature pri spremembi oblike rezalnega roba in cepilnega kota [8]. Parametri so:

rezalna hitrost cutting speed	144	m/min
podajanje feed	0,12	mm
globina reza depth of cut	2	mm/vrt
cepilni kot rake angle	15, 20	°
radij rezalnega roba cutting-edge radius	0,025	mm
material orodja tool-insert material	tungsten carbide	
material obdelovanca workpiece material	X5CrNiMo17122	

The second example shows the isothermal lines of temperature for the case of a change of shape of the cutting edge and rake angle [8]. The parameters are:

4 SKLEP

V današnjem času se je z uvajanjem novih obdelovalnih sistemov povečala potreba po vse boljšem rezalnem materialu in natančnih informacijah o postopkih obdelave in parametrih, ki vplivajo na proces odrezavanja [9]. Za določitev parametrov, ki vplivajo na proces pri odrezavanju, uporabimo programe za analizo in simuliranje. Glede na opravljeno simuliranje in raziskave smo ugotovili in priporočamo za obdelavo materiala AL6061-T6 orodje iz karbidne trdine in delo z naslednjimi tehnološkimi parametri: rezalna hitrost $V_c = 1220$ m/min, podajanje $f = 0,254$ mm/vrt in globina rezanja $a_p = 6,35$ mm. Razlika temperature je pri povečanju hitrosti od 914 do 1220 m/min približno 20°C. Za struženje jekla X5CrNiMo17122 pa priporočamo rezalno orodje iz karbidne trdine (M20-M30 GC2025) in geometrijo rezalne ploščice $\gamma = 15^\circ$ in $r = 0,025$ mm ter naslednje tehnološke parametre odrezavanja: rezalna hitrost $V_c = 144$ m/min, podajanje $f = 0,12$ mm/vrt in globina rezanja $a_p = 2$ mm. S takim prijemom bomo dosegli najboljše rezultate odrezavanja.

4 CONCLUSION

The introduction of new manufacturing systems means there is a need for better cutting materials as well as accurate information on the machining process and the parameters influencing the cutting process [9]. Programs for the analyses and for the simulation were used to determine of the parameters which influence the cutting process. The results of the simulation and experiments reported here support the following conclusions. For machining of the material AL6061-T6 we recommend a tungsten-carbide cutting insert with the following cutting conditions: cutting speed $V_c = 1220$ m/min, feed $f = 0,254$ mm/rev and depth of cut $a_p = 6,35$ mm. The example shows that in the case of an increase in speed from 914 to 1220 m/min the temperature increases by about 20°C. The recommended cutting conditions and geometry of the cutting insert for machining the material X5CrNiMo17122 with a tungsten-carbide cutting insert (M20-M30 GC2025) are: rake angle $\gamma = 15^\circ$, cutting-edge radius $r = 0,025$ mm, cutting speed $V_c = 144$ m/min, feed $f = 0,12$ mm/rev and depth of cut $a_p = 2$ mm. Using this approach the best cutting results can be obtained.

5 LITERATURA 5 REFERENCES

- [1] Shaw, M. C. (1984) Metal cutting principles. *Oxford University Press*, New York.
- [2] Kronenberg, M. (1954) Grundzüge der Zerspanungslehre. *Springer Verlag Berlin*.
- [3] Gottwein, K. (1925) *Maschinenbau* 4, 1129.
- [4] Loewen, E. G., M.C. Shaw (1954) *Trans. Am. Soc. Mech Engrs* 76, 217.
- [5] Leone, W. C. (1954) *Trans. Am. Soc. Mech Engrs* 76, 121.
- [6] Hahn, R. S. (1951) *Proc. First U.S. Nat. Cong. Appl. Mech.*, 661.
- [7] Kopač, J. (1998) Influence of cutting material and coating on tool quality and tool life. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.78 No.1-3, 95-103.

- [8] Čuš, F. (2000) The inclusion of the geometrical shape of the cutter into the optimization of the milling process. *Int. j. adv. manuf. technol.*, vol. 16, no. 6, 392-403.
- [9] Čuš, F. (1997) Analiza suhega rezanja pri postopku čelnega frezanja - Analysis of dry cutting in the process of face milling. *Strojniški vestnik*, let. 43, št. 3/4, 153-159.

Naslov avtorjev: Matjaž Milfelner
prof.dr. Franci Čuš
Inštitut za proizvodno strojništvo
Fakulteta za strojništvo
Univerza v Mariboru
Smetanova 17
2000 Maribor

Authors' Address: Matjaž Milfelner
Prof. Dr. Franci Čuš
Production Engineering Institute
Faculty of Mechanical Eng.
University of Maribor
Smetanova 17
2000 Maribor, Slovenia

Prejeto: 15.9.2000
Received:

Sprejeto: 12.4.2001
Accepted:

Značilnosti radialnih malih vodnih turbin s prečnim tokom

Characteristics of Cross-Flow Radial Mini-Hydro Turbines

Krešimir Franjić

V prispevku je opisana turbina, ki jo običajno poznamo kot Bankijevu turbino. Opravljena je primerjava med dvema posebnima vrstama te turbine: Ossebergerjevo in Cinkovo turbino. Poleg teoretičnih osnov, ki so enake za obe vrsti turbine, so predstavljene najpomembnejše razlike. Na koncu prispevka so predstavljeni sklepi o osnovnih krmilnih značilnostih in učinkovitosti obeh vrst turbin.

© 2001 Strojniški vestnik. Vse pravice pridržane.

(Ključne besede: turbine Banki, turbine radialne, krmiljenje turbin, učinkovitost turbin)

This paper describes a turbine that is usually known as Banki's turbine. A comparison was made between two specialized types of this turbine: Ossberger's and Cink's turbines. Besides the theoretical basis, which is the same for the two types of turbine, the principal differences are specified. At the end of the paper a conclusion is drawn about the basic control properties and efficiency of both turbines.

© 2001 Journal of Mechanical Engineering. All rights reserved.

(Keywords: Banki's turbine, radial turbine, turbine control, turbine efficiency)

1 ZGODOVINSKI POTEK

Teoretično podlago radialne turbine s prečnim tokom z dvojnim pretokom je v 19. stoletju objavil Poncelet. Njen temelj je bilo preprosto vodno kolo. V praksi je to rešitev prvi uresničil priznani avstralski inženir A. S. Michell, ki je svoj stroj patentiral leta 1903.

Po dolgotrajnih raziskavah v Nemčiji je za nadaljnji razvoj tega stroja poskrbel madžarski inženir D. Banki (v času od 1912 do 1919). Razviti stroj je bil patentiran leta 1917. Takrat se je turbina imenovala Michell-Bankijeva turbina.

Sodelovanje med Michellom in Fritzom Ossbergerjem, ki je bil lastnik tovarne v Thalmassingu blizu Nürnbergra, se je začelo v zgodnjih dvajsetih letih 20. stoletja. Posledica tega razvoja je bil nov patent za turbino s prečnim tokom iz leta 1933. Turbina se od takrat v virih pojavlja kot Michell-Ossbergerjeva [1].

Po daljšem premoru pri razvoju turbine te vrste je pomenil naslednjo stopnjo razvoja radialne turbine s prečnim tokom patent češkega inženirja Miroslava Cinka [2]. Proizvodnja, usmerjena v tržišče, se je začela leta 1985 v sodelovanju s češkimi podjetji. Od leta 1992 za njihovo proizvodnjo skrbi tovarna Cink-MVE v Karlovi Varih. Do leta 2000 je bilo izdelanih že več ko 350 turbin.

1 HISTORICAL DEVELOPMENT

The theoretical basis of the cross-flow radial turbine was published by Poncelet in the 19th century. His idea was based on the simple water wheel. The practical outcome of his considerations was developed by an ingenious Australian engineer, A. S. Michell, who patented his machine in 1903.

Further development of this machine resulted from considerable research in Germany by a Hungarian engineer, D. Banki (in the period 1912 to 1919). The machine was patented in 1917. At this time the turbine was known as the Michell-Banki turbine.

A cooperation between Mitchell and Fritz Ossberger, who owned a factory in Thalmassing near Nürnberg, started in the early 1920s. The result was a patent for a cross-flow turbine which was issued in 1933. This turbine has been called the Michell-Ossberger turbine in the literature since this time [1].

After a long pause in the development of this type of turbine a patent by a Czech engineer, Miroslav Cink, introduced a further development of the cross-flow radial turbine [2]. Production began in cooperation with Czech firms in 1985 and since 1992 the turbine has been manufactured at the Cink-MVE factory in Carlsbad. More than 350 turbines had been manufactured and put into operation by 2000.

2 TEORETIČNA NAČELA

Teorijo radialne turbine s prečnim tokom, katere osnova je predelano vodno kolo, je oblikoval Poncelet. Teorija temelji na splošni Eulerjevi turbinski teoriji.

Primer prečnega toka skozi radialno kolo je predstavljen na sliki 1 [5]. Sprememba specifične energije v prvem delu prečnega toka je:

$$Y_{rt1} = u_{11}v_{11u} - u_{12}v_{12u} \quad (1)$$

in v drugem delu:

$$Y_{rt2} = u_{21}v_{21u} - u_{22}v_{22u} \quad (2).$$

Celotna sprememba specifične energije v kolesu je:

$$Y_{rt} = Y_{rt1} + Y_{rt2} \quad (3).$$

Največja sprememba energije je dosežena, ko je:

$$v_{12u} = v_{22u} = 0 \quad (4).$$

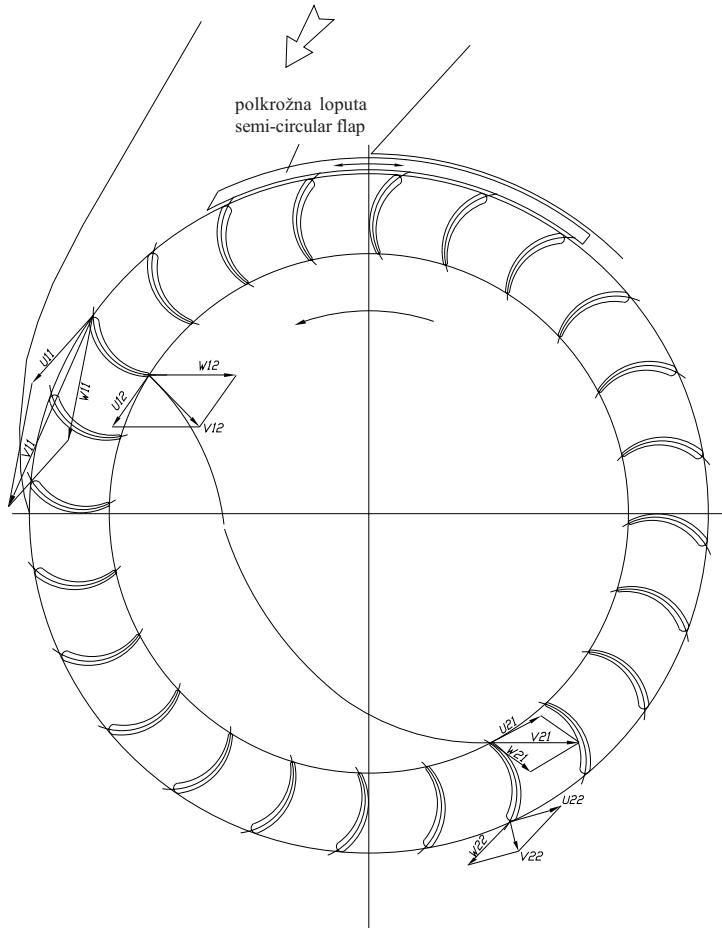
Ta točka se imenuje imenska delovna točka oziroma točka največje učinkovitosti.

The total change in the wheel being:

The maximum change of energy is reached when:

$$(\alpha_{12} = \alpha_{22} = 90^\circ) \quad (4).$$

This point is called the nominal working point or the point of maximum efficiency.



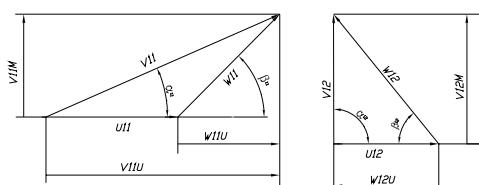
Sl. 1. Primer prečnega toka skozi radialno kolo
Fig. 1. An example of cross-flow through a radial wheel

V tem primeru je celotna sprememba energije v kolesu:

$$Y_{rt,\max} = u_{11}v_{11u} + u_{21}v_{21u} \quad (5)$$

Hitrostni vektorji pri pritoku in odtoku iz posameznih prečnih delov kolesa se ravnajo po zakonih vektorske algebri. V primeru toka skozi kanal lopatičja kolesa govorimo o absolutni hitrosti (v) kot vektorski vsoti obodne hitrosti (u) in relativne hitrosti (w).

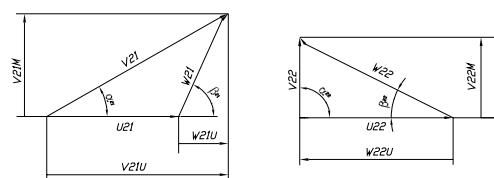
Če vzamemo samo polovico vektorskoga paralelograma, dobimo trikotnik hitrosti. Ti trikotniki so za imensko delovno točko prikazani na sliki 2.



Trikotnika hitrosti - prvi prehod skozi rotor
Vector triangles - first cross-flow

Sl. 2. Vektorski trikotniki hitrosti
Fig. 2. Vector triangles

Prej omenjena sprememba energije je ponazorjena s trikotniki hitrosti kot razlike produktov obodne hitrosti in projekcije vektorja absolutne hitrosti na smer obodne hitrosti med vstopnim in izstopnim robom rotorskega kanala. S pomočjo teh trikotnikov lahko sledimo tudi spremembam, ki jih povzročijo spremembe kinematike toka v turbini. S tem lahko predstavimo razlike med posameznimi turbinami. Če zanemarimo izgube turbine in izstopnega dela, je energija, ki jo daje turbina, enaka:



Trikotnika hitrosti - drugi prehod skozi rotor
Vector triangles - second cross-flow

Fig. 2. Vector triangles

The previous considerations relating to the change of energy are illustrated by velocity triangles as a product of the lengths of the circumferential velocity vector and the projection of the absolute velocity vector onto the direction of the circumferential velocity during the two passages across the wheel cascade. The triangles also enable us to follow the changes caused by flow alterations in the turbine; this can be used to prove the differences between the individual turbines. If the turbine losses and the suction-bell or diffuser effects are neglected the power generated by the turbine is:

$$P \approx \rho Y_{rt} Q \quad (6)$$

in jo lahko pri nespremenljivi višini H_n spremenjamamo samo s pretokom.

Prostorninski pretok Q v turbinu lahko spremojamo z različnimi metodami: s preprostim ventilom oziroma lokom (Banki), s hidrodinamično loputo (Ossberger) oziroma s profilno oblikovanim polkrožnim lokom (Cink).

V naslednjem delu bomo predstavili analizo turbine z vidika možnosti krmiljenja toka in posledic krmiljenja na karakteristike turbine.

and can be changed only by the rate of flow at the constant height H_n .

The rate of flow Q into the turbine may be changed by various methods: a simple valve or segment (Banki), a hydrodynamic flap (Ossberger) or a profile-shaped semicircular segment (Cink).

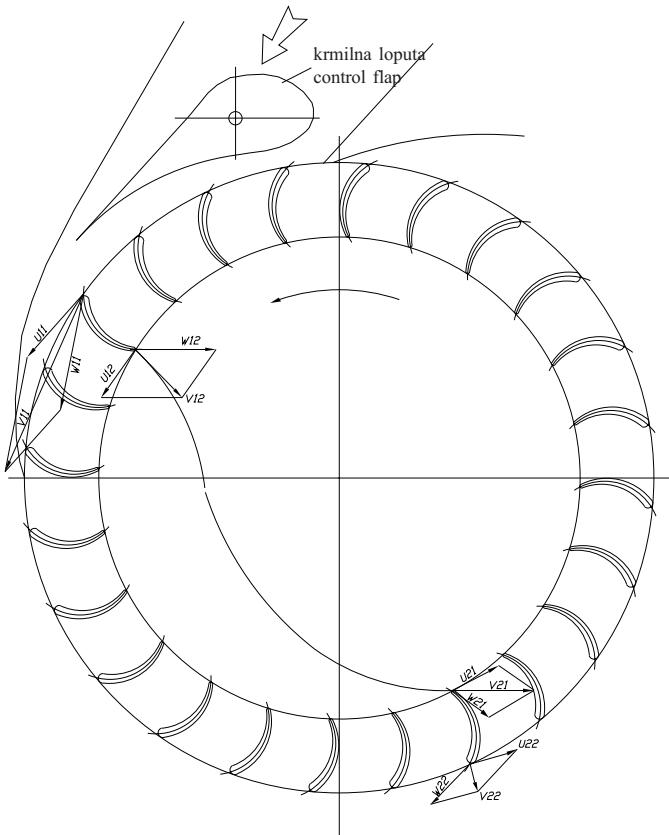
In the following part an analysis of the turbine will be made from the point of view of flow control possibilities and the consequences of this control as principal features of the turbine.

3 ANALIZA HIDRODINAMIČNIH ZMOŽNOSTI RADIALNE TURBINE S PREČNIM TOKOM

Natok na rotor Cinkove turbine je prikazan na sliki 1, natok na rotor Ossbergerjeve turbine pa na sliki 3. Sliki se v imenski delovni točki med seboj ne razlikujeta. Zaradi tega obe omenjeni turbini v tej točki dosegata enak izkoristek (če seveda zanemarimo posledice sesalnega zvona pri Ossbergerjevi turbine oziroma učinke difuzorja pri Cinkovi turbine).

3 AN ANALYSIS OF THE HYDRODYNAMIC POSSIBILITIES OF CROSS-FLOW RADIAL TURBINES

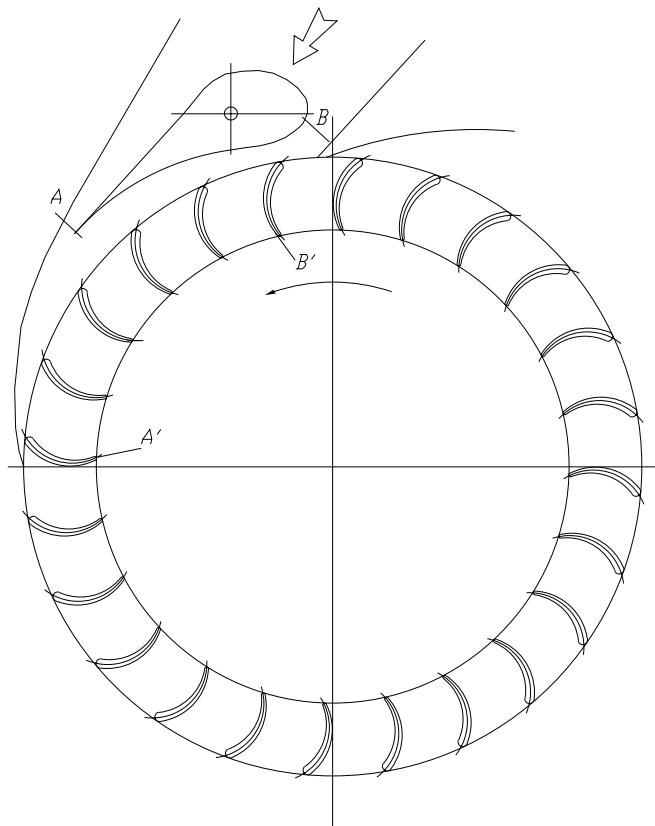
The flow into the Cink turbine wheel is shown in Fig. 1. Fig. 3 illustrates the flow into the Ossberger turbine wheel. Comparing these figures for the nominal point of operation indicates that there is no difference. This is the reason why both turbines reach the same efficiency at this point (when the effects of the suction bell for the Ossberger or the diffuser for the Cink are neglected).



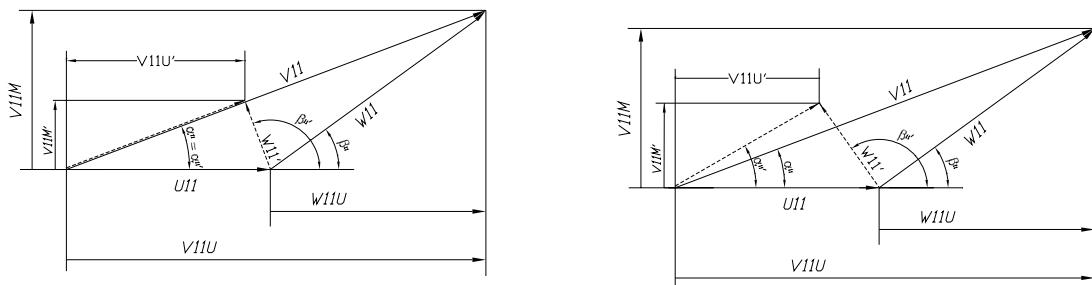
Sl. 3. Tok skozi Ossbergerjevo turbino
Fig. 3. Flow through Ossberger turbine

Če je treba pretok vode skozi turbino zmanjšati (zahteva električnega omrežja oziroma naravno zmanjšanje prostorninskega pretoka), moramo Cinkovi turbini postopno zapreti polkrožni lok. V tem primeru je površina vstopnega prereza zmanjšana, hitrostni trikotniki pa ostanejo nespremenjeni. Pri Ossbergerjevi turbine se kinematika natoka na rotor spremeni, ko zasukamo dinamično loputo (sl. 4). Smer vektorja absolutne hitrosti v_{11} določa oblika stene okrova turbine, kar ima za posledico, da sta kota enaka ($\alpha_{11} = \alpha'_{11}$). Zmanjšanje pretoka kot posledica spremembe položaja lopute neposredno vpliva na zmanjšanje meridianskih in obodnih komponent hitrosti v_{11} , kar je predstavljen na sliki 5.

When it is necessary to diminish the flow (electric grid demand or natural flow decrease) the Cink turbine must have the semicircular segment gradually closed. In this case the inflow cross-sections is smaller but the triangle of velocities remains unchanged. For the case of the Ossberger turbine the inflow is changed by turning the flap (Fig. 4) to alter the inflow cross-sections (denominated A and B in Fig. 4). Turning the flap changes the flow conditions in the cascade in the zone limited by blades A' and B'. On the blades A' and B' the absolute velocity-vector direction remains unchanged as it is formed by the walls of the casing ($\alpha_{11} = \alpha'_{11}$). The consequences may be seen in the velocity-vector triangle in Fig. 5, left. The flow decrease leads to a decrease in both the meridional component



Sl. 4. Spremembra pritoka Ossbergerjeve turbine
Fig. 4. Change of inflow of Ossberger turbine



Sl. 5. Vektorski trikotnik hitrosti
Fig. 5. Velocity-vector triangle

Obodna hitrost u_{11} naj bi zaradi generatorjeve nespremenljive vrtilne frekvence ostala nespremenjena. Omeniti je treba, da sprememba toka povzroči spremembo kota β'_{11} , t.j. vstopnega kota na lopatice.

Vsaki lopatici, ki se nahaja med A' in B', se drugače ($\alpha_{11} \neq \alpha'_{11}$) spremeni smer vektorja absolutne hitrosti. To stanje lahko na splošno opišemo z vektorskim trikotnikom hitrosti, prikazanim na sliki 5, desno; sprememba β'_{11} je še vedno večja.

Na obeh omenjenih slikah so trikotniki, ki ustrezajo imenski točki, prikazani s polnimi črtami. Trikotniki, ki ustrezajo manjšemu pretoku, so prikazani s pikčastimi črtami. Očitne so spremembe vstopnega

v_{11M} and the circumferential component v_{11U} . The circumferential velocity u_{11} should remain unchanged because of the generator's uniform revolution. It should be noted that the flow change causes a change in the angle β'_{11} , i.e. the blade's angle of attack.

The blades remaining between A' and B' suffer from the change in the absolute velocity-vector direction being different ($\alpha_{11} \neq \alpha'_{11}$) for each of them. The state can be generally described by the velocity-vector triangle in Fig. 5, right; the change of β'_{11} is still greater.

In both figures the triangles corresponding to the nominal point are shown in full lines, and the triangles corresponding to a low rate of flow by dot-

kota β_{11} , ki jih povzročijo spremembe sestavin absolutne hitrosti.

Če so lopatice narejene tako, da ustrezajo toku v imenski delovni točki, z ustreznim kotom β_{11} , je z vidika hidravlike vsako odstopanje iz te smeri neugodno. To povzroči hitro zmanjšanje učinkovitosti že pri majhni spremembi lege delovne točke iz imenske delovne točke.

Opisana dejstva pojasnijo vzrok za naglo spremembo učinkovitosti s pretokom pri aktivni celici Ossbergerjeve turbine, kakor prikazuje nepretrgana črta na sliki 6. Vsled pomembnega zmanjšanja učinkovitosti je moral Ossberger uvesti delni tok z dvema celicama (z razmerjem pretoka 1:2) z dvema neodvisnima krmilnima loputama, da bi dosegel delovanje v širokem razponu pretoka vode pri spremenljivih naravnih pretočnih razmerah. Učinek uporabe delnega toka in dveh neodvisnih loput prikazuje krivulja učinkovitosti. Prikazana je na sliki 6 kot črtkana črta.

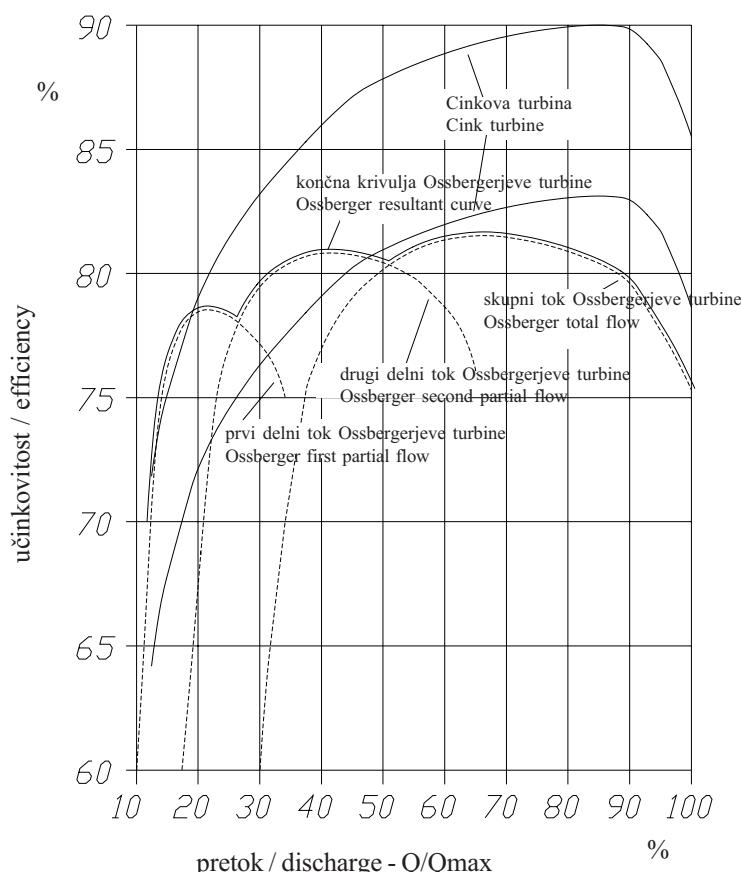
Če si ogledamo Cinkovo turbino, lahko opazimo razlog za uvedbo profilirane polkrožne lopute. Ker je prvi vstopni trikotnik hitrosti nespremenljiv (z izjemo zelo nizkih razmerij pretoka) in optimalen, se zaradi tega pojavi spremenljiva učinkovitost, ki je

ted lines. The changes in the angle of attack β_{11} are evident, caused by the absolute velocity-component changes.

If the runner blades are designed and made to suit the flow at the nominal point with a corresponding angle of β_{11} , any deviation from this direction is unfavorable from the point of view of hydraulics. This causes a rapid decline in efficiency for very small rate-of-flow changes from the nominal point valve.

This explains the change in the efficiency with the inflow at the active cell for the Ossberger turbine, shown by the continuous line in Fig. 6. Ossberger was therefore forced to introduce a partial flow with two cells (with a flow rate ratio of 1:2) with two independent control flaps, in order to be able to work over the wide range of flow resulting from changeable natural conditions with an acceptable efficiency of the turbine. The effect of using partial flow and two independent flaps is illustrated in Fig. 6 by the resultant curve of the activity level, shown by the dashed line.

If we now take a look at the Cink turbine we can see the reason for the introduction of the profiled semi-circular flap. The first passage velocity triangle is constant (with the exception of extremely



Sl. 6. Učinkovitost turbin

Fig. 6. Turbine efficiency

odvisna od položaja lopute in prostorninskega pretoka, kar je razvidno iz črtkane površine na diagramu na sliki 6.

4 PREOSTALE RAZLIKE

Bankijeva turbina je turbina akcijskega tipa, tlak v okrovu je atmosferski. Nameščena mora biti precej visoko nad spodnjo vodno gladino, da se rotor ne dotika vodne gladine. Posledično je precejšnja izguba geodetske višine pomembna predvsem v primerih manjših višin, ki so tipične za večino izvedb.

Michell in Ossberger sta problem rešila z uvedbo cevi za podprtisk v okrovu turbine, kar turbini omogoča, da je neodvisna od sprememb spodnjega nivoja. Zato je treba na okrov turbine namestiti vzmetni ventil za omejevanje podtlaka.

Nespremenljivi premer sesalne cevi ne omogoča popolne pretvorbe hitrostne energije izstopne vode, označene kot v_{22} na sliki 2. Hitrost vode v sesalni cevi običajno znaša od 2,5 do 3,5 m/s. Če upoštevamo srednjo vrednost 3 m/s, je ustrezni dinamični tlak izražen s tlačno višino:

$$h_v = \frac{v^2}{2g} = 0,459 \text{ m} \quad (7)$$

To višino moramo odšteti od geodetske višine, ker ne prispeva k proizvodnji energije. Če je na primer geodetska višina 3 m, je izguba končne energije 15,3-odstotna, kar znaša 0,459 m. Zato je Ossbergerjeva turbina pri majhnih višinah zelo neučinkovita.

Cink je spremenil sesalno cev v obliko difuzorja s povečanjem prereza v smeri navzdol. Z uporabo difuznega efekta lahko izkoristimo večino izstopne energije. Če sprememimo zgoraj omenjeni primer v difuzor iz izstopno hitrostjo 1 m/s, se izguba pri izstopu zmanjša na 0,051 m, kar je 1,7 odstotka geodetske višine. Na ta način je postala Cinkova turbina sprejemljiva celo za gradnje pri izjemno majhnih višinah, kar je velika prednost v primerjavi z Ossbergerjevo turbino.

5 SKLEPI

Cinkova turbina pomeni tretjo generacijo razvojnega postopka turbin s prečnim pretokom. Če jo primerjamo z Bankijevim in Ossbergerjevo turbino, pridemo do naslednjih sklepov:

Delovne karakteristike turbine

Delovno območje Cinkove in Ossbergerjeve turbine znaša 20 do 100 odstotkov največjega prostorninskega pretoka vode skozi turbino. Pri Bankijevi turbini je zaradi občutljivosti na tokovne spremembe delovno območje občutno manjše. Cinkova in Ossbergerjeva turbina sta skoraj

low rates of flow) and optimum the consequence is a tolerant surface of the change of the activity level with inflow, shown by the hatched area in Fig. 6.

4 THE REMAINING DIFFERENCES

The Banki turbine is an action-type turbine, i.e. the pressure in the casing is atmospheric. It has to be placed quite high above the lower water level to prevent the blades from touching the water. A significant loss of geodetic head results, significant in the case of low heads which are typical for most installations.

Michell and Ossberger solved the problem by introducing a tube for underpressure in the casing making the turbine independent of lower level variations. To achieve this an underpressure limiting spring operated air valve had to be installed in the casing.

A constant-section suction tube did not enable the full use of the outlet water velocity, shown as v_{22} in Fig. 2. This is approximately the velocity in the suction tube. Its value is usually between 2.5 and 3.5 m/s. If the mean value of 3 m/s is used the corresponding:

This head is taken away from the geodetic head, i.e. is not used for power generation. For instance in the case of a geodetic head equals to 3 m, a loss of 15,3 percent (i.e. 0,459 m) from the energy at hand results. This makes the Ossberger turbine very uneconomic at low heads.

Cink modified the suction tube into the shape of a diffuser there by increasing the section in the downward direction. By making use of the diffuser effect most of the runner outlet energy could be used. Modifying the above-mentioned example to a diffuser outlet speed of 1 m/s the outlet loss is reduced to 0.051 m making it 1.7 percent of the geodetic head. In this way the Cink turbine was acceptable even for extremely low head installations which is its great advantage over Ossberger turbine.

5 CONCLUSIONS

The Cink turbine is the third generation in the development of cross-flow turbines. By comparing it to the Banki and Ossberger turbines we can conclude:

Turbine working conditions

The working range of the Cink and Ossberger turbines is 20 to 100% of the flow through the turbine. For the Banki turbine (because of its sensitivity to flow changes) this range is considerably smaller. Cink and Ossberger turbines are nearly independent of low water level varia-

neobčutljivi za spremembe nizke gladine vode (difuzor oziroma sesalna cev), pri čemer je treba Bankijevo turbino dvigniti nad največjo višino spodnje vode.

Krmiljenje moči

(nastavitev pri dejanskih pretočnih razmerah)

Pretočne razmere v manjših rekah se čez leto zelo spremijajo, zato je potrebna velika prilagodljivost turbine, da bi lahko obratovala čim več ur v letu. Glede na druge vrste turbin za majhne hidroelektrarne sta Cinkova in Ossbergerjeva turbina najbolj prilagodljivi na tokovne spremembe. Pri Cinkovi turbini lahko to dosežemo z enim krmilno zanko, pri čemer sta zaradi delnega toka pri Ossbergerjevi turbini dve neodvisni krmilni zanki. V tem pogledu je Cinkova turbina preprostejša in sprejemljivejša rešitev. Njenostavnejša pa je Bankijeva turbina, ker se pretok krmili z zapornim ventilom. Vendar je pri tem treba upoštevati posledice, ki jih povzroča tovrstno krmiljenje.

Učinkovitost

Sklepe o učinkovitosti Ossbergerjeve in Cinkove turbine lahko razberemo s slike 6. Pri obeh turbinah sta največji učinkovitosti večji kakor pri drugih vrstah turbin za manjše hidroelektrarne. Če ti turbini primerjamo med seboj, opazimo razliko zaradi načina spremenjanja toka skozi turbino in zaradi uporabe difuzorja pri Cinkovi turbini. Cinkova turbina ima povprečno za nekaj odstotkov večjo učinkovitost. Tolerantno območje učinkovitosti Cinkove turbine je povezano z obstojem optimalne geometrijske oblike pretočnega trakta glede na razpoložljiv vodni potencial. Verjetno so pri Ossbergerjevi turbini razmere enake, vendar jih proizvajalec ne omenja. Zaradi preprostejšega krmiljenja toka Bankijeve turbine ne moremo primerjati z drugima dvema turbinama, saj je njeno področje delovanja veliko manjše.

Cena

Čeprav je cena odvisna od mnogih dejavnikov, je glavni dejavnik, ki določa ceno turbine, preprostost turbine. S tega vidika je Bankijeva turbina najpreprostejša in zato tudi najcenejša. Če pa bi k ceni prišteli učinke uporabe vodnega potenciala, je ta turbina s preostalima dvema neprimerljiva.

V primerjavi z Ossbergerjevo ima Cinkova turbina prednost povprečno boljše uporabe vodnega potenciala, poleg tega pa je z vidika krmiljenja preprostejša.

Omenjene prednosti turbine, ki jo je patentiral M. Cink, naredijo turbino izvirno in drugačno od njenih predhodnic (Michell-Banki in Michell-Ossberger). Zaželena je uporaba izraza "Cinkova turbina", kajti ta izraz se uporablja tudi v tehnični zgodovini. Pomembno je namreč, da izumiteljevo ime ne bi šlo v pozabovo, kakor se je zgodilo v primeru Michella.

tions (diffuser or suction tube) whereas the Banki turbine must be raised above the maximum low water level.

Power control

(adjustment for natural flow conditions)

Small rivers have a very variable flow over the course of a year, which means that the maximum flexibility is required from the turbine in order that it can work as many hours in a year as possible. In comparison with other turbines, Cink and Ossberger types have the most adaptability to flow change. For the Cink turbine this can be achieved with one control laps, whereas for the Ossberger turbine there are two independent control laps (because of the partial flow). In this respect the Cink turbine is the simpler and more acceptable as a solution. The Banki turbine, with the flow controlled by a gate valve, is the simplest but with all the consequences of such control on the hydrodynamics through the turbine.

Efficiency

From Fig. 6 conclusions about the efficiency of the Ossberger and Cink turbines can be reached. For both turbines the maximum efficiencies are greater than for other types of turbines for small hydro power stations. The method of changing the flow through the turbines is different because of the use of a diffuser in Cink turbines. The Cink turbine has a higher efficiency (on average) of several percent. The area of efficiency for the Cink turbine is connected with the existence of the optimum geometry of the current apparatus according to the available hydropotential. There are probably similar conditions for the Ossberger turbine but the manufacturer does not specify them. The Banki turbine, because of the more primitive flow control, cannot be compared to be above-mentioned turbines, because it has a much lower activity level.

Price

Although the price depends on many factors, the simplicity of the turbine can be considered as the primary factor. On this basis the Banki turbine is the simplest and consequently the cheapest. However, if we build in the effects of the use of the hydropotential into the price, then this turbine, compared to the other two turbines, becomes uncompetitive.

Comparing Ossberger and Cink turbines we can conclude that the Cink turbine has the advantages of (on average) better hydropotential use, and simplicity in terms of control.

The advantages of the turbine patented by M. Cink make the turbine original and different from the previous types (Michell-Banki and Michell-Ossberger). The author feels it is right to use the term "Cink turbine" as it is clear that the turbine will be known by this name in technical history. There is also another reason. The name of the inventor should not get lost as happened with the name Michell.

6 SIMBOLI 6 SYMBOLS

specifična energija	Y	J/kg = m ² /s ²	specific energy
obodna hitrost	u	m/s	tangential velocity
absolutna hitrost	v	m/s	absolute velocity
relativna hitrost	w	m/s	relative velocity
hitrostna višina	h	m	velocity head
težni pospešek	g	m/s ²	gravity
moč	P	W	power
prostorninski pretok	Q	m ³ /s	volume flow rate
gostota	ρ	kg/m ³	density
absolutni kot	α	-	absolute angle
relativni kot	β	-	relative angle

Indeksi

število pretočnih poti
vstopne (1) in izstopne (2) razmere rotorja
rotor - teoretično
projekcija na obodno hitrost
največja vrednost
hitrost

prva št. / first No.
druga št. / second No.
rt
u
max
v

Subscripts

number of flow path
rotor inlet (1) or outlet (2) condition
rotor - theoretical
projection to circumferential velocity
maximum value
velocity

7 LITERATURA 7 REFERENCES

- [1] Khosrowpanah, S., M.L. Albertson, A.A. Fiuzat (1984) Historical overview of cross-flow turbine. *Water Power & Dam Construction*, 38 – 43.
- [2] Franjić, K. (1994) Novi tip turbine za male hidroelektrane. *Energetika-Gospodarstvo-Ekologija-Etika (EGE)*, 36 – 38.
- [3] OSSBERGER factory prospects.
- [4] CINK factory prospects.
- [5] Franjić, K. (1994) Neki karakteristični usporedbeni detalji različitih vrsta dvostrujnih radijalnih turbina za male hidroelektrane. *Hrvatske vode*, 354 – 359.

Avtorjev naslov: dr. Krešimir Franjić
Fakulteta za strojništvo
in pomorstvo
Ivana Lučića 5
10000 Zagreb, Hrvatska

Author's Address: Dr. Krešimir Franjić
Faculty of Mechanical Eng.
and Naval Architecture
Ivana Lučića 5
10000 Zagreb, Croatia

Prejeto:
Received: 19.2.1998

Sprejeto:
Accepted: 12.4.2001

Strokovna literatura Professional Literature

Iz revij

IZ DOMAČIH REVIJ

Elektrotehniški vestnik, Ljubljana

2000, 3-4

Svečko, R., Dolenc, P.: Daljinsko vodenje komornih peči
Zec, M., Hvala, N., Strmčnik, S.: Ocenjevanje
parametrov nelinearnega biološkega modela in
vrednotenje meritev v povezavi z validacijo
modela za izbrani namen uporabe

2000, 5

Divjak, S.: JavaScript in simulacije dinamičnih pojavov
Guštin, V.: Ali poznamo mikroprocesor Pentium III?
Mutec, M., Tasič, J.F.: Uporaba statističnih momentov
za razpoznavo števk

Livarski vestnik, Ljubljana

2000, 2

Veber, Z.: Vpliv energije in stroškov nekakovosti na
ekonomiko poslovanja v MPP Livarni

2000, 3

Bührig-Polaczek, A., Schindelbacher, G., Rocken-
schaub, H.: Hitra izdelava prototipov v livarstvu

Les, Ljubljana

2000, 12

Naglić, V.: Izbira večlistnega krožnega žagalnega stroja

Obzornik za matematiko in fiziko, Ljubljana

2000, 5

Mohorič, A.: Sprejemnost tuljave

Organizacija, Maribor, Kranj

2000, 9

Varian, H.R.: Prihodnost elektronskih revij
Jereb, E., Rajkovič, V.: Uporaba ekspertnega sistema
v procesu izbire kadrov
Pogačnik, A.: Organiziranje Slovenskega inštituta za
standardizacijo z upoštevanjem evropskih načel

2000, 10

Biloslavo, R.: Uporaba AHP metode in teorije mehkih
množic v portfolio analizi
Mrkaić, M.: Uporaba proste programske opreme pri
planiranju proizvodnje

Varilna tehnika, Ljubljana

2000, 3

Kogej, Ž., Diaci, J., Polajnar, I.: Integracija merilnikov mehanskih
veličin v stroj za uporovno točkovno varjenje

Grad, L., Polajnar, I., Poljanec, G.: Postopki spajanja v
proizvodnji hladilnih naprav

Tehnika rezanja z vodnim curkom tudi iz Avstrije!
Schweib- und Prüftechnik, 53 (1999) 10, prevod:
A. Brezovnik

IIW priporočila za popravilo varjenih konstrukcij,
obremenjenih z utrujanjem, IIW/IIS-1340/96,
prevod in privedba: J. Tomc

IZ TUJIH REVIJ

Tehnički vjesnik, Slavonski Brod

1999, 3,4

Kljin, M.: Novo energetsko doba i ekologija

Aerospace America, Reston

2000, 11

Kimmel, R., Orkwis, P., Smith, D., Lurie, E.: Fluid dy-
namics enters the 21st century

2000, 12

Polites, M.: Digital avionics
Cetocha, P.: Intelligent systems
Dasgupta, S.: Sensor systems

CDA, Condizionamento dell'aria Riscaldamento Refrigerazione, Milano

2000, 10

Vio, M.: Le celle a combustibile
Nocera, U.: Gli impianti di climatizzazione per la qualità
dell'aria di bar e ristoranti

2000, 11

Lombardi, C., Sacchi, A., Chierotti, A., Soma, F.:
Incertezze strumentali nella contabilizzazione del
calore con metodi indiretti
Colombari, M., Cesaratto, G.A., Zecchin, R.: Ponti
termici nelle strutture edilizie

2000, 12

Laurenti, L., Marcotullio, F.: Analisi in regime vario
dello scambio termico acqua-tubo in un pannello
radiante a pavimento
Colombari, M., Cesaratto, G.A., Zecchin, R.: Ponti
termici nelle strutture edilizie

Eisenbahn Österreich, Wien

2000, 12

Breimeier, R.: Trennung von Fahrweg und Betrieb mit
Wettbewerb auf dem Netz – die Zukunft der
Eisenbahn?

Engineering Review, Rijeka**1999, 19**

Dobrinić, J., Miločić, B.: Optička fluorescencija vode onečišćene naftom- koncentracija do 2000 mg l⁻¹
Siminiati, D.: Određivanje stupnja iskoristivosti hidrostatskog sustava

Ambrožič, V., Nedeljković, D.: Suvremena mikro računala u reguliranim elektromotornim pogonima
Grubešić, W., Komadina, R.: Ugradnja prigušivača buke u cjevovodu ispuha ventilatora za odstranjivanje kapljica

HLH, Heizung Lüftung/Klima Haustechnik, Düsseldorf**2000, 11**

Müller, D., Zeller, M.: Eine alternative Methode zur Bestimmung der Lüftungseffektivität
Glück, B.: Wärmephysiologische Bewertung von Kühlsystemen zur Raumklimatisierung

2000, 12

Puschmann, F., Sellnow, U., Specht, E., Oehler, K.-J.: Ölheizung mit Brennwerttechnik
Kunst, B.: Kostenorientiertes Optimieren von Brennwertkesseln – Teil 1
Schlott, S.: Pseudolastspitzen durch Kompaktstationen

IDR, Industrie Diamanten Rundschau, Willich**2000, 4**

Fleming, M.A., Bossom, P.K.: PCBN – Leistungsziele für das 21. Jahrhundert

Uhlmann, E., Friemel, J., Brücher, M.: Bearbeitung einer übereutektischen Aluminium-Silizium-Legierung
Pickles, C.S.J., Madgwick, T.D., Sussmann, R.S., Hall, C.E.: Optische Anwendungen von CVD-Diamant

IDR, Industrial Diamond Review, Ascot**2000, 4**

Fleming, M.A., Bossom, P.K.: PCBN – performance goals for the 21st century
Patz, M., Dittmar, H., Hess, A., Wagner, W.: Better hard turning with optimised tooling
Pickles, C.S.J., Madgwick, T.D., Sussmann, R.S., Hall, C.E.: Optical applications of CVD diamond

Renewable Energy World, London**2000, 11-12**

Renner, M.: Energy alternatives and jobs
Pitcher, K.: Turning willow into megawatts: The ARBRE project

Vytápení Vetrání Instalace, Praha, Bratislava**2000, 5**

Schmidt, P.: K přímému vytápení velkých hal
Ondroušek, K.: Přivzdušnovací veňtil ve vnitřní kanalizaci
Centnerová, L.: Tepelná pohoda a nepohoda

Ocene knjig**J. Schöttner: Produktdatenmanagement in der Fertigungsindustrie**

Zal.: Carl Hanser Verlag, München – Wien 1999.
Obseg: format 16 x 24 cm, 384 strani, 200 slik.
Cena je 98 DEM.

Uvodno poglavje je namenjeno opisu aktualnih tem v proizvodnih podjetjih (globalna konkurenca, strateški cilji, obdelava informacij, pereči problemi pri obdelavi informacij).

Sledi poglavje o zahtevah po informacijskih in komunikacijskih tehnikah, kjer so opisane informacijske mreže, organizacija podatkov, podatki in zagotavljanje kakovosti.

Podrobno sta opisana načelo in način dela proizvodno podatkovnega menedžmenta (struktura informacijskih tehnik, struktura informacij, funkcionalnost) ter koncepti in uporaba proizvodno podatkovnega menedžmenta.

Zadnje poglavje govori o strategiji uvedbe proizvodno-podatkovnega menedžmenta v podjetje

(cilji podjetja, definicija projekta, načrtovanje in realizacija projekta).

Knjiga je namenjena načrtovalcem informacijskih sistemov podjetja ter študentom, kijih zanimajo koncepti in strategije gradnje informacijskih sistemov.

M. Starbek

R. Weber: Zeitgemäße Materialwirtschaft mit Lagerhaltung

Zal.: Expert Verlag GmbH, Renningen – Malsheim, 4. izdaja 2000.
Obseg: format 14,5 x 24 cm, 324 strani, 138 slik.
Cena je 89 DEM.

Pri skladiščenju je treba paziti, da dosežemo čim niže stanje, čim krajše pretočne čase in čim boljše izpolnjevanje terminov.

V prvem poglavju so opisani ciljni konflikti gospodarjenja z materialom. Uvodnemu poglavju sledi poglavje o inštrumentih, ki naj bi zagotovili

gospodarno ravnanje z materiali. Tretje poglavje opisuje izvedbo nadzora kakovosti materiala. Sledi poglavje o sistemu KANBAN, sistemu CIM in računalniško podprttem gospodarjenju z materialom. V nadaljevanju je opisan proces stalnih izboljšav KVP ter instrumenti za krajevanje pretočnih časov.

Posebno poglavje je namenjeno vitki strukturi podjetja, modernim sistemom skladiščenja in metodam racionalizacije skladiščenja materiala.

Knjiga je namenjena študentom proizvodnega strojništva, ekonomistom in ljudem v podjetjih, ki se ukvarjajo s problemi gospodarjenja z materiali.

M. Starbek

A.K. Bergbauer: Die Unternehmensqualität messen – den Europäischen Qualitätspreis gewinnen

Zal.: Expert Verlag GmbH. Renningen – Malmsheim
1999.

Obseg: format 16 x 23 cm, 222 strani, 160 slik.

Cena je 59 DEM.

Knjiga se ukvarja s problematiko menedžmenta kakovosti. V uvodu se ukvarja z

vprašanjem, kaj je kakovost. Sledi poglavje o sistemih menedžmenta kakovosti, sitemu celovitega obvladovanja kakovosti TQM ter evropski nagradi za kakovost EQA. Pomembno je poglavje o E.F.Q.M. – modelu podjetja, ki opisuje merila za usposabljanje, delo in rezultate dela ter izvedbo samovrednotenja (E.F.Q.M. – katalog vprašanj, knjiga vrednotenja).

Posebno poglavje je namenjeno kandidiranju za EQA – kako kandidirati in kako poteka izbira dobitnikov.

Zadnje poglavje govori o integraciji kakovosti v globalnem podjetju (uvajanje, zadovoljstvo strank, motivacija in zadovoljstvo sodelavcev, tekma brez ciljev).

Knjiga je namenjena glavnim organizatorjem podjetja, načrtovalcem strategij in osebam, zadolženim za kakovost.

M. Starbek

Osebne vesti

Personal Events

Nagrade študentom

Prešernova nagrada Univerze v Ljubljani:

Žiga Kogej

Delo: Brezkontaktno merjenje ugreza elektrod pri uporovnem točkovnem varjenju

Mentor: doc.dr. Ivan Polajnar

Smentor: doc.dr. Janez Diaci

Žiga Kogej je rojen 24. oktobra 1976. leta v Ljubljani. Svoja otroška in mladostna leta je preživel v Idriji, kjer je 1991. leta knčal osnovno šolo in 1995. leta maturiral na gimnaziji Jurija Vege. V Ljubljano se je vrnil z vpisom na Fakulteto za strojništvo, kjer je bil ves čas študija med najboljšimi študenti. V tretjem in četrtem letniku je prejel nagrado za najboljšega študenta letnika ter junija leta 2000 z odliko diplomiral na smeri proizvodnega strojništva.

Delo obsega konstrukcijsko izboljšavo serijsko izdelanega stroja za uporovno točkovno varjenje, pripravo eksperimentalnega sistema za dinamično spremljanje sile in ugreza elektrod med procesom varjenja, izvedbo meritev in analizo rezultatov.

Pri vsakem od navdihovih segmentov opravljenega dela je nagrajenc pokazal izredno samostojnost in pronicljivost, tako pri neposrednem eksperimentalnem delu kot pri teoretičnih razlagah.

Najobsežnejši delež opravljenega dela predstavlja razvoj računalniško podprtga eksperimentalnega sistema, ki omogoča sprotno zajemanje električnih in mehanskih veličin med procesom uporovnega točkovnega varjenja. Za merjenje pomika elektrod je nagrajenc uporabil laserski merilnik, s katerim je uspel dobiti natančnejše in verodostojnejše podatke o temperaturnih raztezkih pri tem načinu varjenja.

Na osnovi analize rezultatov je predlagal konstrukcijske izboljšave serijsko izdelanega stroja, ki jih je proizvajalec že apliciral na najnovejši generaciji strojev za uporovno točkovno varjenje.

Samostojnost in prodornost nagrajenca se kaže tudi v tem, da je rezultate dela predstavil pred domačo in tujo strokovno javnostjo. To še posebej velja za dokument III. komisije, ki ga je predstavil na letni skupščini Mednarodnega instituta za varjenje v Firencah. Tu se je enakopravno vključil v razpravo s svetovno priznanimi eksperti s področja uporavnega varjenja in z inovativnim pristopom ter svežimi idejami vzbudil veliko zanimanje prisotnih.

Prva nagrada Fakultete za strojništvo v Ljubljani:

Jaka Pelhan

Delo: Analiza napovedljivosti obrabe rezalnega orodja

Mentor: prof.dr. Igor Grabec

Smentor: doc.dr. Edvard Govekar

Jaka Pelhan s je rodil 2.10.1975 v Kranju. Osnovno šolo in gimnazijo je obiskoval v Ljubljani. Po zaključenem izpitu na gimnaziji, je leta 1995 šolanje nadaljeval na univerzitetnem študiju na Fakulteti za strojništvo v Ljubljani. Študij je leta 2000 tudi uspešno končal. Poleg študijskih obveznosti se je v času študija, kot član državne reprezentance v badmintonu udeležil večih mednarodnih tekmovanj. Trenutno je na služenju civilne vojaške obveznosti.

Naslov dela, ki ga je Jaka Pelhan predložil za Prešernovo nagrado je Analiza napovedljivosti obrabe rezalnega orodja. Namens dela je bil, s pomočjo računalniško simuliranih nevronskeih mrež in metod kaotične dinamike raziskati možnosti kratkoročne in dolgoročne napovedljivosti obrabe rezalnega orodja. V delu je pregledno podal nekatere osnove nevronskeih mrež in metod kaotične dinamike. Neuronske mreže je uporabil za modeliranje napovedi obrabe orodja. Pri tem je uporabil tri različne tipe nevronskeih mrež. S primerjavo rezultatov napovedi je pokazal, da je za napoved obrabe rezalnega orodja najprimernejša nevronska mreža radialnih baznih funkcij s spremenljivo strukturo. Na osnovi predpostavke o kaotičnosti rezalnega procesa je izvedel oceno dolgoročne napovedljivosti obrabe orodja na podlagi ocene povprečne divergencije časovnih potekov obrabe orodja. Dobljeni rezultati so izkazali zelo dobro ujemanje z rezultati dolgoročne napovedi obrabe rezalnega orodja izvedene s pomočjo računalniško simulirane neuronske mreže.

Druga nagrada Fakultete za strojništvo v Ljubljani:

Jure Klemenčič

Delo: Frezanje prostorskih oblik v kaljeno jeklo

Mentor: prof.dr. Janez Kopač

Jure Klemenčič se je rodil 15.6.1975. Srednješolsko izobraževanje je končal leta 1995 na gimnaziji Bežigrad na programu Gimnazijski maturant. Na Fakulteto za strojništvo se je vpisal v šol. l. 1995/96 in v rednem absolventskem času, septembra 2000,

diplomiral na univerzitetnem študiju na smeri Energetika in procesno strojništvo.

V delu "Frezanje prostorskih oblik v kaljeno jeklo", ki ga je izdelal pod mentorstvom prof.dr. Janeza Kopača, so opisane osnove visokohitrostne obdelave ter povezave s petosnim frezanjem. Predstavljene so izvedbe petosnih frezalnih strojev, njihove prednosti in slabosti. Podrobnejše je razdelano CNC programiranje strojev na primeru CAD/CAM paketa Mastercam, omenjene so smernice prihodnjega razvoja. Osrednji del naloge obravnava funkcije petosnih postprocesorjev, izvedena je aplikacija na dveh strojih s podrobno razloženo transformacijo koordinat. Realiziran je bil primer obdelave obdelovanca, kjer je bilo praktično potrjeno, da je petosna obdelava racionalna.

Tretja nagrada Fakultete za strojništvo v Ljubljani:

Janez Marko Slabe

Delo: Raziskava mehanskih lastnosti in mikrostrukturi izločevalno utrjevalnega jekla primerenega za izdelavo orodij za tlačno litje

Mentor: prof.dr. Janez Grum

Janez Marko Slabe se je rodil 6. julija 1975 na Vrhniku. Srednješolsko izobraževanje je končal v letu 1994, na Fakulteti za strojništvo – smer Proizvodno strojništvo pa je diplomiral v decembru 1999.

V uvodnem delu je kandidat poleg splošne problematike tlačnega litja predstavil tudi teoretične osnove izločevalnih procesov pri uporabi tako imenovanih Maraging jekel. Praksa je pokazala, da

zelo pomembno vpliva na lastno ceno izdelka tudi pravilna izbira materiala in njegova pravilna toplotna obdelava.

V obsežno zastavljenem eksperimentalnem delu naloge je kandidat izvedel preko 50 različnih režimov toplotne obdelave na Maraging jeklu 1.2799 (Thyssen) s tremi ponovitvami. Izvedel je merjenje trdote po Rockwellu, udarni preizkus po Charpy-ju pri temperaturi okolice in obratovalni temperaturi orodja za tlačno litje ter natezni preizkus. Rezultate izločevalnega utrjevanja je kandidat poleg poznavanih mehanskih lastnosti potrjeval še z analizami mikrostrukturnih posnetkov vzorcev na optičnem in elektronskem mikroskopu. Nadalje je z rentgensko spektroskopijo potrdil prisotnost posameznih izločkov, ter analiziral njihov vpliv na utrjevanje materiala. Pri tem je ugotovil, da lahko zagotovimo dobre mehanske lastnosti in želeno obnašanje materiala v obratovanju z zagotavljanjem enakomerne in fine porazdelitve izločkov v mehki osnovni matrici. Kandidat je na osnovi analize mikrostrukturi in mehanskih lastnosti uspešno določil optimalne pogoje izločevalnega utrjevanja jekla. To sta temperatura in čas izločanja.

Iz opravljenega dela kandidata lahko ugotovimo, da je bil pri pripravah in izvedbah raziskav, kot tudi pri analiziranju doseženih rezultatov in ocenjevanju slednjih zelo rigorozan, sistematičen in kritičen, saj mu ne uidejo niti najmanjše podrobnosti. Pri tem je svoje rezultate zelo kritično soočil z rezultati, ki so do sedaj objavljeni le v tuji strokovni literaturi in še posebej s podatki proizvajalca ter zelo vestno ugotavlja njihova odstopanja.

Magisteriji, diplome

MAGISTERIJI

Na Fakulteti za strojništvo Univerze v Ljubljani je dne 19. januarja 2001 Mirjana Plečko, roj. Grčić z uspehom zagovarjala svoje magistrsko delo z naslovom: "Tlačne izgube dvofaznega toka v T-razcepu cevi".

S tem je navedena kandidatka doseгла akademsko stopnjo magistre tehničnih znanosti.

DIPLOMIRALISO

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

dne 26. januarja 2001: Gregor BOBOVNIK, Igor FLAJS, Matej KOSEM, Primož PANGERŠIČ, Vinko VRABEC, Uroš ZALETEL.

*

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

dne 12. januarja 2001: Gregor BOGATAJ, Dejan GOLOB, Bojan MARINKO, Marjan ROJC, Franc ROZMAN, Franc ZUPANČIČ.

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

dne 25. januarja 2001: Rajko HABJANIČ, Damjan RIBIČ, Andrej VERNIK.

*

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

dne 25. januarja 2001: Darko KELHER in Nedjo SEDLAREVIČ.

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 postavitev 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 pospološtive, uporabljene za pridobitev rezultatov. Prikazana naj bo tudi pomembnost rezultatov in primerjava s poprej objavljenimi deli. (Zaradi narave posameznih raziskav so lahko rezultati in razprava, za jasnost in preprostejše bralčevu razumevanje, združeni v eno poglavje.)
- Sklepi, v katerih naj bo prikazan en ali več sklepov, ki izhajajo iz rezultatov in razprave.
- Literatura, ki mora biti v besedilu oštevilčena zaporedno in označena z oglatimi oklepaji [1] ter na koncu članka zbrana v seznamu literature. Vse opombe naj bodo označene z uporabo dvignjene številke¹.

Oblika članka

Besedilo naj bo pisano na listih formata A4, z dvojnim presledkom med vrstami in s 3 cm širokim robom, da je dovolj prostora za popravke lektorjev. Najbolje je, da pripravite besedilo v urejevalniku Microsoft Word. Če uporabljate kakšen drug urejevalnik besedil, prosimo, da besedilo konvertirate v navadno ASCII (tekstovno) obliko. Hkrati dostavite odtis članka na papirju, vključno z vsemi slikami in preglednicami ter identično kopijo v elektronski obliki.

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

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

Enote in okrajšave

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

Papers submitted for publication should comprise:

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

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

The format of the paper

The paper should be written in the following format:

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

The layout of the text

Texts should be written in A4 format, with double spacing and margins of 3 cm to provide editors with space to write in their corrections. Microsoft Word for Windows is the preferred format for submission. If you use another word processor, please convert to normal ASCII (text) format. 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 Italic (e.g. *v*, *T*, *n*, etc.). Symbols for units that consist of letters should be in plain text (e.g. ms⁻¹, K, min, mm, etc.).

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

Slike

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

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

Vse označbe na slikah morajo biti dvojezične.

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

Preglednice

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

Vsi podnaslovi preglednic morajo biti dvojezični.

Seznam literature

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

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

Podatki o avtorjih

Članku priložite tudi podatke o avtorjih: imena, nazive, popolne poštne naslove, številke telefona in faks 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 izpopolnitve ter terminološke in jezikovne korekturje.

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

Rokopisi člankov ostanejo v arhivu SV.

Vsa nadaljnja pojasnila daje:

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

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

Figures

Figures must be cited in consecutive numerical order in the text and referred to in both the text and the caption as Fig. 1, Fig. 2, etc. 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 Italic), units (normal text), should be added in new line without brackets.

All table captions must be bilingual.

The list of references

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

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

Author information

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

Acceptance of papers and copyright

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

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

Papers will be kept in the archives of the JME.

You can obtain further information from:

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