

## Sprotne identifikacije rezalnega procesa na makro nivoju On-line Cutting Process Identification at the Macro Level

SLAVKO DOLINŠEK

V članku so prikazani rezultati sprotne identifikacije rezalnega procesa na makro nivoju, praktično izvedenega pri vzdolžnem ortogonalnem struženju. Identifikacija temelji na kibernetički zasnovi obdelovalnega sistema, ki popisuje proces z oceno prenosne funkcije, definirane na vstopno/izstopnih energijskih povezavah. Oblika prenosne funkcije je karakteristika rezalnega procesa v povezavi s strukturno dinamiko obdelovalnega sistema v sklenjeni zanki. S spremenjanjem obdelovalnih razmer se značilno spreminjajo ocenjene vrednosti parametrov prenosne funkcije (vrednosti ojačanja in dušenja). Tovrstne identifikacijske karakteristike lahko zato uporabimo kot učinkovite informacije v prilagodljivem krmiljenju rezalnega procesa.

Ključne besede: procesi rezanja, identifikacija procesov, modeli energijski, funkcije prenosne

In the paper, the results of the on-line identification of the cutting process at the macro level of straight orthogonal turning are presented. A cybernetic concept of the machining system, proposed as a basis of identification, describes the process by estimation of the transfer function defined by the input/output energy relations. The shape of the transfer function is a characteristic of the cutting process in connection with the structure dynamics of the machining system in closed loop. In relation to the changes in cutting conditions, a significant change occurs in the transfer function parameter estimates (gain and the damping values). Such identification characteristics provide effective information for reliable adaptive control of the cutting process.

Keywords: cutting process, identification, energy model, transfer function

### 0 UVOD

Obdelovalni proces mora biti izpeljan v optimalnih razmerah, kar pomeni odstraniti čimvečjo prostornino obdelovanega materiala v določenem času ob stabilnem procesu skozi celoten obdelovalni cikel. Ti dve zahtevi sta si v nasprotju, zato je naloga raziskovalcev razviti ustrezne nadzorne in krmilne sisteme, ki bodo zagotavljali nemoten obdelovalni proces tudi pri težkih in zahtevnih režimih dela. V zadnjih letih je bilo vloženih veliko naporov v raziskave in vpeljavo različnih uporabnih tehnik za nadzor orodja [1], vendar so praktične izvedbe še vedno predrage in nezanesljive.

Modeli, ki popisujejo rezalni proces na determinističen način, slonijo na predpostavkah napovedljivosti statičnih in dinamičnih lastnosti procesa. Zaradi zapletenosti obdelovalnega procesa in uporabljenih omejitvenih približkov so ti modeli v glavnem nenatančni, vendar so tovrstni prijemi veliko prispevali k razumevanju osnovnih načel odrezovalnih procesov. Cilji raziskav morajo zato biti usmerjeni v razvoj zanesljivih metod sprotne identifikacije, povezanih z optimizacijo in v končni fazi prilagodljivim krmiljenjem procesa. Možnosti za uresničenje takšnih zahtev pa so v tesni povezavi z zmožnostjo ocene prenosnih karakteristik rezalnega procesa [2].

### 0 INTRODUCTION

The machining process has to be realised in optimum conditions, which means the maximum removal volume of the workpiece in desired time at stable process through the entire machining cycle. Since these two demands are in opposition, the research tasks are to develop the appropriate supervision and control systems which should assure an undisturbed machining process, also in heavy and exacting cutting conditions. Great efforts have been made during the last decade in researching and introducing different applications of tool monitoring techniques [1], however the practical applications are still too expensive and unreliable.

The models defining a cutting process in a deterministic way are based on the presumptions of predictable static and dynamic characteristics of the process. Due to the complexities of the machining process and the use of limitation assumptions, these models are more or less inaccurate; however these approaches do contribute significantly towards understanding the basic principles of the material removal process. The objectives of the research must therefore be focused on the development of reliable methods for on-line identification, connected with the optimisation and finally the adaptive control of the process. The possibilities for the realisation of such demands are closely connected to the ability to estimate the transfer characteristics of the machining processes. [2].

Predlagana sprotna identifikacija oziroma določitev vstopno/izstopnih karakteristik rezalnega procesa in njihovih ocen temelji na dolgoletnem tovrstnem raziskovalnem delu prof. Peklenika, začetega leta 1964 z zamislio, ki popisuje obdelovalni proces kot črno škatlo [3]. Z obravnavanjem celotnega obdelovalnega procesa v zaprti zanki in prikazom naključnega karakterja parametrov rezalnega procesa so bili postavljeni temelji za identifikacijo rezalnega procesa glede na vstopno/izstopne energijske povezave [4]. Prenosno funkcijo tako določamo iz meritev časovno odvisnih sprememb določenih vstopno/izstopnih parametrov procesa.

Nadaljevanje raziskav v tej smeri je bilo mogoče v zadnjih letih zaradi hitrega razvoja tehnologij zaznavanja in obdelave signalov. Leta 1985 je bila predstavljena zamisel o medpovršinskih vmesnikih in energijskih kvantih [5] in kasneje rezultati raziskav na mikro nivoju [6]. Zadnje potrditve na makro nivoju rezalnega procesa, narejene pri različnih rezalnih parametrih in obrabah orodja, pa potrjujejo sprejemljivost predlaganega modela kot eno od metod za sprotno oceno karakteristik rezalnega procesa [7] in [8].

## 1 ENERGIJSKI MODEL ZA IDENTIFIKACIJO REZALNEGA PROCESA

Največ uporabljeni energijski model pravokotnega odrezovanja, ki ga je predlagal Merchant [9], definira vstopno energijo rezalnega procesa kot vsoto transformacijske in izstopne energije. Vstopna energija se porabi za preoblikovanje obdelovanega materiala v odrezek, za premagovanje trenja na orodju in odrezku, pa tudi za pospeševanje odrezka in oblikovanje novonastale površine. Zadnji dve, kinetično in površinsko energijo, običajno zanemarjam, upoštevati pa ju moramo pri velikih hitrostih obdelave. Glavni del, ki sestavlja izstopno energijo, je torna energija, potrebna za nastajanje tornih medpovršinskih vmesnikov. Glede na ugotovljeni naključni značaj energij je bil predlagan razširjen model, ki upošteva njihove časovne spremembe [3]:

Za pravokotni model odrezovanja, prikazanega na sliki 1, izrazimo vstopno in izstopno energijo v obliki merjenih časovno odvisnih sprememb parametrov energijskih enačb [4]:

$$U_i(t) = F_z(t)[v_i(t) \pm \dot{z}(t)] \quad (2)$$

$$U_o(t) = F_y(t)[v_o(t) \pm \dot{y}(t)] \quad (3)$$

The proposed on-line identification or determination of the input/output characteristics of the cutting process and their estimation are based on many years of research work by Prof. Peklenik, starting in 1964 with the idea of describing the machining process as a black box [3]. By considering the entire machining process in a close loop with a machine tool and presenting the stochastic character of the parameters of the cutting process, his model proposed as the basis for identification of the cutting process on input/output energy relations [4]. In such a way the transfer function is determined on the basis of time series measurements of the selected input/output parameters.

The continuation of this research was encouraged in recent years by rapid developments in the area of sensing technology and signal processing. In 1985, the idea of surface interfaces and energy quanta was presented [5], and later the results of the research at the micro level [6]. The latest verifications at the macro level of the cutting process, made at different cutting parameters and tool wears confirmed that the proposed model is one of the acceptable methods for on-line estimation of the cutting process [7] and [8].

## 1 ENERGY MODEL FOR THE IDENTIFICATION OF CUTTING PROCESS

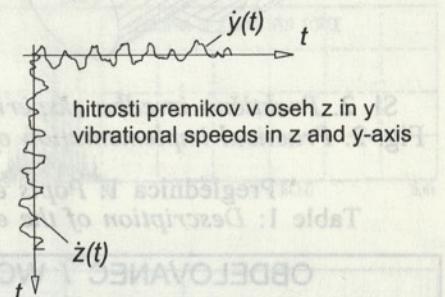
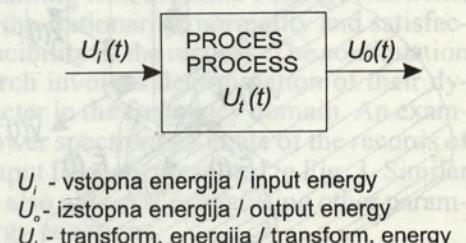
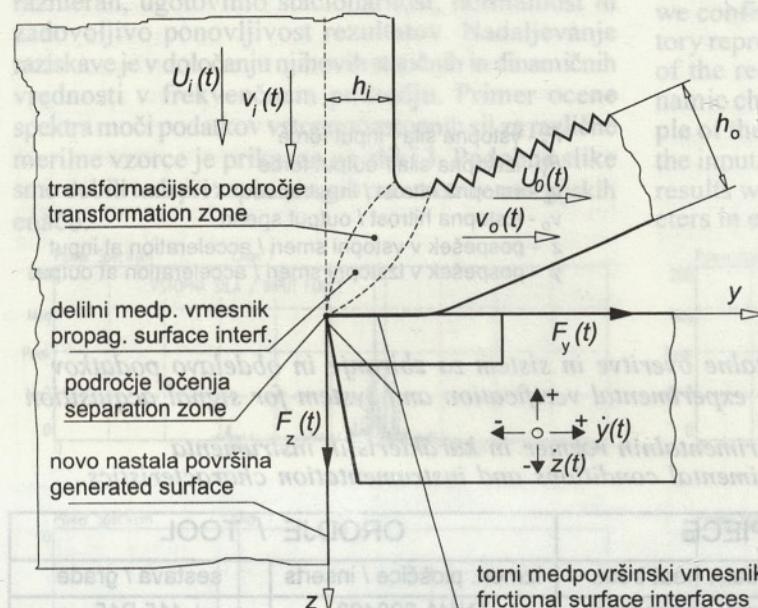
The usual energy model for orthogonal cutting, proposed by Merchant [9], expresses the input energy of the process as a sum of transformation and output energies. The input energy is used for the transformation of workpiece material to a chip, for overcoming the chip and tool friction, and also for chip acceleration and new surface formation. Regarding the latter, the kinetic and surface energies are normally neglected, but they should be considered in high speed cutting. The main part constituting the output energies is the friction energy necessary for the frictional surface interface realisation. According to the presentation of the stochastic character of energies, the extended energy model was proposed in the form of a time series [3]:

$$U_i(t) = U_i(t) + U_o(t) \quad (1)$$

For the orthogonal cutting model, presented in Figure 1, the input and output energies are expressed in the form of their measured time series parameters [4]:

Rezalni proces je tako mogoče popisati s sprotnim ocenjevanjem vrednosti vstopno/izstopnih energij in njihovih spektralnih ocen. Prenosna funkcija je definirana kot razmerje med oceno križne spektralne moči med vstopno in izstopno energijo in oceno spektralne moči vstopajoče energije [6]:

$$\hat{H}(f) = \frac{\hat{G}_{U_i U_o}(f)}{\hat{G}_{U_i U_i}(f)} = |\hat{H}(f)| e^{-j\phi(f)} \quad (4)$$



Sl. 1. Energijski model rezalnega procesa in parametri vstopno/izstopnih energij [4], [6]  
Fig. 1. Energy model of the cutting process and the parameters for the input/output energies [4], [6]

## 2 OPIS EKSPERIMENTALNEGA SISTEMA

Za eksperimentalno potrditev predstavljenega modela potrebujemo na vstopu rezalnega procesa obdelovanec in orodje, obnovljeni eksperimentalni obdelovalni stroj pa je zagotavljal ustrezna relativna kinematična gibanja za odstranjevanje materiala. Dodatno potrebna oprema so zaznavala za spremljanje parametrov energijskih enačb in instrument za hkratno obdelavo podatkov vseh zaznaval v realnem času. Praktična izvedba preizkusa na primeru pravokotnega vzdolžnega struženja ter uporabljenia zaznavalna in merilna oprema je prikazana na sliki 2 [10].

Zaznavalni sistem vsebuje zaznavalo sile, zaznavalo za merjenje pospeška rezalnega robu (hitrosti relativnih premikov) in zaznavalo rezalne hitrosti. S svojimi lastnostmi zaznavala ne vplivajo na pričakovane frekvenčne značilnosti rezalnega procesa. Največji problem je pri merjenju hitrosti odtekanja odrezka. Ideja o sprotnem spremljanju zdaj še ni bila uresničena, tako da je treba te hitrosti računati iz medsebojnih povezav debelin odrezka in rezalnih hitrosti. V preglednici 1 je podan popis karakteristik obdelovanega materiala in orodja, območje uporabljenih rezalnih razmer in nastavitev inšumenta za zbiranje in obdelavo podatkov.

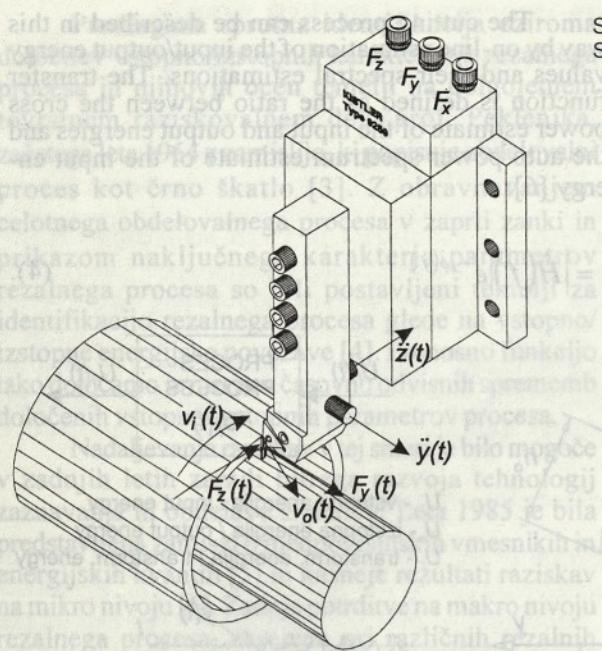
The cutting process can be described in this way by on-line estimation of the input/output energy values and their spectral estimations. The transfer function is defined as the ratio between the cross power estimate of the input and output energies and the auto power spectrum estimate of the input energy [6]:

$U_i$  - vstopna energija / input energy  
 $U_o$  - izstopna energija / output energy  
 $U_t$  - transform. energija / transform. energy

## 2 DESCRIPTION OF THE EXPERIMENTAL SET-UP

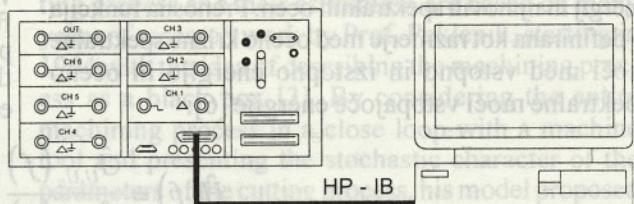
For experimental verification of the above model, we needed - at the input of the cutting process - the workpiece and cutting tool, while for providing the relative kinematic movements for material removal, a renovated experimental machine tool was used. Additional equipment to access all parameters in energy equations includes sensors and an acquisition system to record all measured parameters simultaneously in real time. In Fig. 2 the practical implementation of the experiment in orthogonal straight turning , and the sensory and measuring equipment is presented [10].

The sensing system consists of a force sensor, cutting edge acceleration (relative velocity displacement) sensors and a cutting speed sensor. Their characteristics do not interfere within the studied frequency range of the cutting process. The greatest problem exists in measuring the chip flow speed. Online possibilities have so far not been materialised, so that the speeds had to be defined from interrelations between chip thickness and cutting speeds. Description of the workpiece material, cutting tool geometry, the range of selection the cutting conditions and instrumentation characteristics are presented in Table1.



Spektralni analizator HP356 A  
Spectrum Analyzer HP3567A

HP Merilni program  
HP Measurem. Software



$F_z$  - vstopna sila / input force

$F_y$  - izstopna sila / output force

$v_c$  - vstopna hitrost / input speed

$v_o$  - izstopna hitrost / output speed

$\ddot{z}$  - pospešek v vstopni smeri / acceleration at input

$\ddot{y}$  - pospešek v izstopni smeri / acceleration at output

Sl. 2. Praktična izvedba eksperimentalne overitve in sistem za zbiranje in obdelavo podatkov  
Fig. 2. Practical implementation of the experimental verification and system for signal acquisition

Preglednica 1: Popis eksperimentalnih razmer in karakteristik inštrumenta  
Table 1: Description of the experimental conditions and instrumentation characteristics

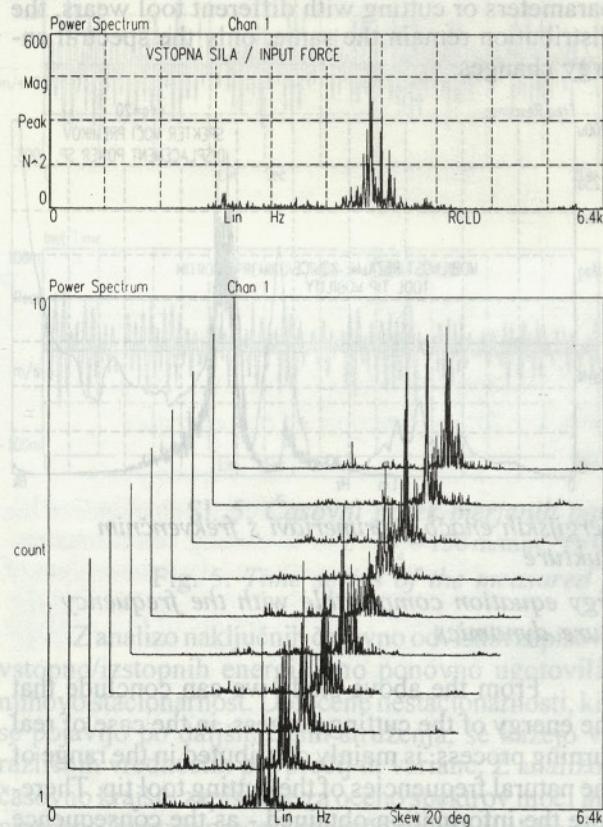
OBDELovanec / WORKPIECE		ORODJE / TOOL	
material / material	toplota obdel. / heat treat.	Izmen. ploščice / inserts	sestava / grade
jeklo / steel C45E4 - ISO	normalizirano / normalized	TNMA 220408	415 P15
REZALNI PARAMETRI / CUTTING CONDITIONS			
rezalna hitrost / cut. speed 50 ... 250 m/min	podajanje / feed 0,106 ... 0,303 mm/vrt	globina / dept	hlajenje / lubrication suhu / dry
NASTAVITVE MERILNEGA INŠTRUMENTA / INSTRUMENTATION CHARACTERISTICS			
dolžina zapisa / sample length 5 s	frekven. območje / freq. range 6,4 kHz	ločljivost / resolution 1600 linij /lines	Št. povpr. / aver. No. 40

Obdelovalni sistem (obdelovalni stroj, držalo orodja, zaznavala) mora zagotavljati znane in nespremenljive značilnosti prek celotnega območja uporabljenih rezalnih parametrov. Ustreznih statičnih in dinamičnih značilnosti posameznih delov obdelovalnega stroja ni treba določati, saj je za potrditev predlaganega modela dovolj, da opazujemo rezalni proces samo v rezalni točki in definiramo vse potrebne značilnosti ustrezno tej točki. Z uporabo metod modalne analize [11] oziroma z merjenjem frekvenčnih odgovorov na konici sestavljenega rezalnega sklopa (orodje/dinamometer/stroj) smo določili izrazite resonančne vrhove rezalne konice v smeri vstopa (3,68 kHz) in izstopa (2,25 kHz) procesa. Ko je dinamometer sestavni del rezalnega sklopa, se njegova resonančna frekvenca zniža (5,0 kHz v rezalni in 4,28 kHz v podajalni smeri), a je še vedno nad frekvenčnim območjem rezalnega procesa.

The whole machining system (machine-tool, tool-holder, sensors) should ensure the presence of well-known and unchangeable characteristics throughout a whole range of applied cutting parameters. The appropriate static and dynamic characteristics of the machine tool parts need not to be defined since, for verification of the proposed model, it is sufficient to observe the process only at the cutting point; then all the necessary characteristics are defined in accordance with this point. Using modal testing methods [11] - i.e. by measuring the frequency responses at the end of the entire cutting assembly (tool/dynamometer/machine), - we defined the peak resonant frequency of the cutting tip in the input (3.68 kHz) and output (2.25 kHz) direction of the process. When the dynamometer is a constitute part of the cutting assembly its resonant frequencies are lower (5.0 kHz in the cutting and 4.28 kHz in the feeding direction), however this is still above the frequency range of the cutting process.

### 3 OCENE SPEKTRA MOČI PARAMETROV ENERGIJSKIH ENAČB IN POVEZAVA NJEGOVE PORAZDELITVE S STRUKTURNO DINAMIKO REZALNE KONICE

Začetne analize izmerjenih časovno odvisnih zapisov parametrov energijskih enačb so zajemale pregled njihove ponovljivosti v istem časovnem vzorcu in med posameznimi časovnimi vzorci. Iz statističnih ocen zapisov, dobljenih pri struženju v enakih rezalnih razmerah, ugotovimo stacionarnost, normalnost in zadovoljivo ponovljivost rezultatov. Nadaljevanje raziskave je v določanju njihovih statičnih in dinamičnih vrednosti v frekvenčnem področju. Primer ocene spektra moči podatkov vstopno/izstopnih sil za različne merilne vzorce je prikazan na sliki 3. Podobne slike smo dobili tudi pri zapisu drugih parametrov energijskih enačb.



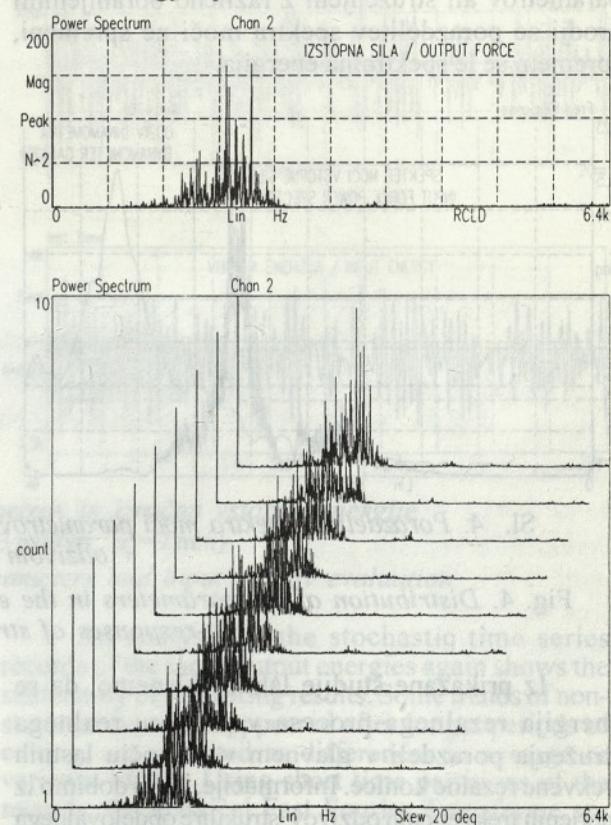
Sl. 3. Ocena spektra moči iz časovno odvisnih vzorcev vstopno/izstopnih sil  
( $v_c = 150 \text{ m/min.}$ ,  $f = 0,193 \text{ mm/vrt.}$ ,  $a_p = 2 \text{ mm}$ )

Fig. 3. Estimated power spectrum from the time series samples of input and output forces

Iz povprečnih ocen spektra moči merjenih sil in hitrosti relativnih premikov rezalne konice lahko ugotovimo, da je njihova amplitudna porazdelitev v območju od 1 kHz do 5 kHz. Primerjava med rezultati sil in premiki tudi pokaže na dobro medsebojno soodvisnost oziroma podobnost v porazdelitvi teh parametrov energijskih enačb v vstopni ali izstopni smeri procesa. V nasprotju pa sta vstopna in izstopna hitrost porazdeljeni v frekvenčnem območju pod 1 kHz in ne vplivata značilno na frekvenčno porazdelitev vstopno/izstopnih energij.

### 3 POWER SPECTRUM ESTIMATE OF THE PARAMETERS IN ENERGY EQUATIONS, AND RELATIONS TO THE STRUCTURE DYNAMICS OF THE CUTTING TIP

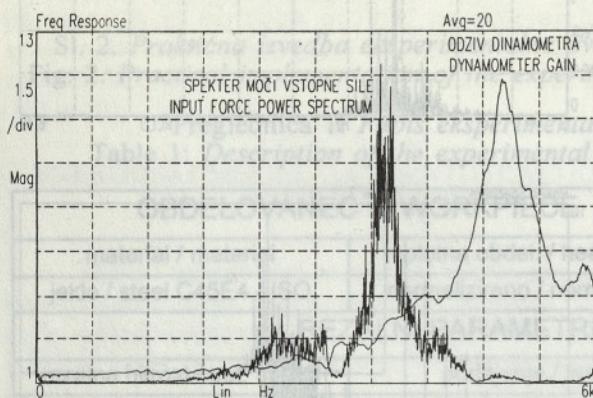
The first step in analysing the measured time series records of the parameters in energy equations consists of the review of their reproducibility both at the same sample and between the samples. From the statistical estimates of the time series samples, obtained in turning with the same cutting conditions, we confirm the stationarity, normality and satisfactory reproducibility of the records. The continuation of the research involves determination of their dynamic character in the frequency domain. An example of the power spectrum estimate of the records of the input/output forces is presented in Fig. 3. Similar results were also obtained in analysing other parameters in energy equations.



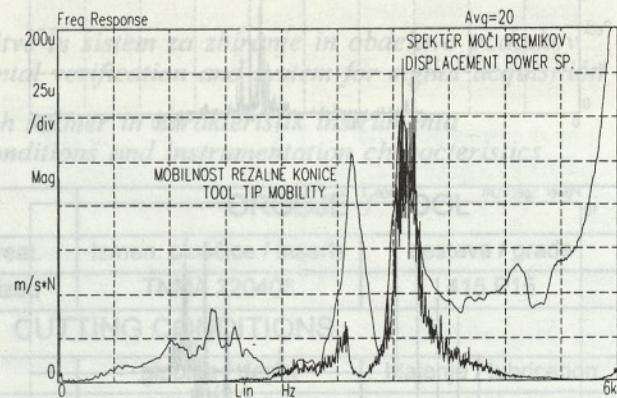
Sl. 3. Ocena spektra moči iz časovno odvisnih vzorcev vstopno/izstopnih sil  
( $v_c = 150 \text{ m/min.}$ ,  $f = 0,193 \text{ mm/vrt.}$ ,  $a_p = 2 \text{ mm}$ )

From the averaged power spectra estimates of the cutting forces and the records of the tool-tip relative displacement speeds we can locate their amplitude distributions between 1 kHz to 5 kHz. The comparison between the forces and displacements also shows a good correlation indicating similarity in process parameters within the input or output direction of the process. By contrast, the input and output speeds are distributed in frequency ranges below 1 kHz, and do not have a significant influence on the frequency distribution of the input/output energies.

Izmerjeni frekvenčni odgovori rezalne konice (modalne karakteristike strukture) dajejo potrebne informacije za razumevanje dinamičnega karakterja parametrov vstopno/izstopnih energij. Povezava njihove frekvenčne vsebine glede na značilne resonančne vrhove frekvenčnega odgovora rezalne konice je prikazana v diagramu, ki prikazuje prekrivanje med ocenami spektra moči in rezultati, dobljenih z modalno analizo (sl. 4). Če primerjamo frekvenčno porazdelitev vstopne sile s izmerjenim odzivom dinamometra v tej smeri, lahko vidimo, da dinamometer s svojim odgovorom ne vpliva na porazdelitev rezalne sile. Prav tako lahko ugotovimo, da so ocenjeni spektri moči sil in hitrosti relativnih premikov porazdeljeni ustrezzo resonančni frekvenci konice rezalnega robu. Podobne ugotovitve veljajo tudi za izstopno smer procesa. S spremembami rezalnih parametrov ali struženjem z različno obrabljenimi orodji se porazdelitev spektra moči ne spremeni, spremeni se le spektralna energija.



The measured frequency response at the cutting tip (modal characteristics of the structure) gives us the necessary information to understand the dynamic character of the parameters in input/output energy equations. To interpret their frequency content in relation to the distinctive resonant amplitudes of the frequency response of the tool-tip, we plot the overlay indicating the connection between the power spectra estimates of the measured parameters and the results obtained from modal analysis (Fig. 4). If we compare a frequency distribution of the input force with the dynamometer gain in the same direction, we notice that the dynamometer, by its response, does not interfere with the cutting force distribution. We can also observe that the estimated power spectra of the force and relative displacement speed is distributed in agreement with the resonant frequency of the cutting tool-tip. Similar findings can be established for the output direction. With the changes in cutting parameters or cutting with different tool wears, the distribution remain the same, only the spectral energy changes.



Sl. 4. Porazdelitev spektra moči parametrov energijskih enačb v primerjavi s frekvenčnim odzivom strukture

Fig. 4. Distribution of the parameters in the energy equation comparable with the frequency responses of structure dynamics

Iz prikazane študije lahko sklenemo, da se energija rezalnega procesa v primeru realnega struženja porazdeli v glavnem v območju lastnih frekvenc rezalne konice. Informacije, ki jih dobimo iz merjenih frekvenčnih odzivov strukture obdelovalnega sistema torej kažejo, da so v območju lastnih frekvenc nihajočih delov sistema z manjšimi masami (držalo orodja) ustreze informacije, ki jih lahko povežemo s parametri rezalnega procesa.

#### 4 ČASOVNI POTEKI ENERGIJ IN NJIHOVE SPEKTRALNE OCENE

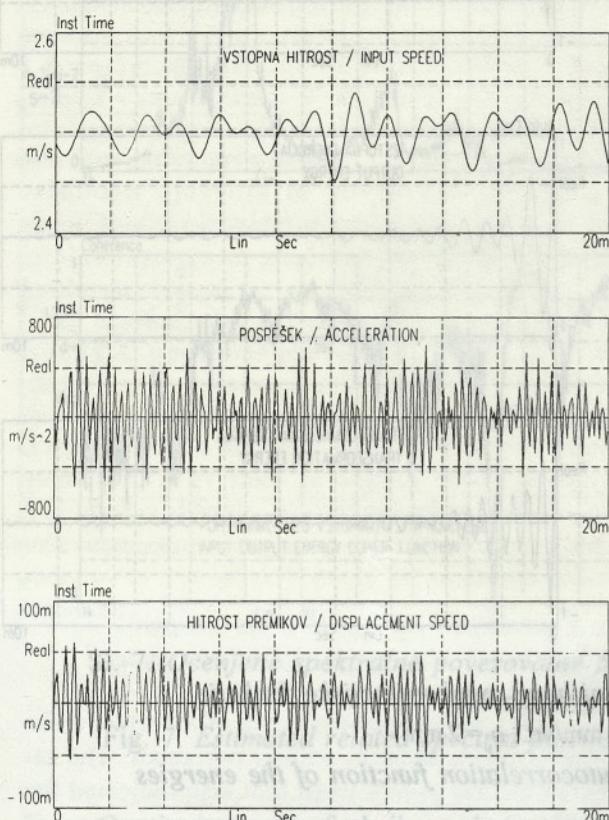
Časovne spremembe vstopno/izstopnih energij računamo iz izmerjenih zapisov parametrov energijskih enačb, ustrezeno definicijam, podanih v anačbah (3) in (4). Primer časovnega zapisa parametrov vstopne energijske enačbe (rezalne hitrosti, pospeška rezalnega robu, izračunane hitrosti relativnih premikov,

From the above study we can conclude that the energy of the cutting process, in the case of real turning process, is mainly distributed in the range of the natural frequencies of the cutting tool tip. Therefore the information obtained - as the consequence of vibrating the machine tool parts with a lower mass (tool holder) in the range of their resonant frequencies - gives comprehensive data to be used in reference to the cutting process parameters.

#### 4 ENERGY TIME SERIES AND THEIR SPECTRAL ESTIMATIONS

The fluctuations of the input/output energies were determined from measured records of the parameters in energy equations according to the definitions from equations (2) and (3); an example of time series records of the input parameters (cutting speed, acceleration, computed relative displacement speed,

razlike med rezalno hitrostjo in hitrostjo premikov, sile) in končni rezultat, izračunani časovno odvisni zapis vstopne energije, je prikazan na sliki 5. Podoben potek velja tudi za računanje izstopne energije, medtem ko transformacijsko energijo izračunamo kot razliko med vstopno in izstopno energijo.



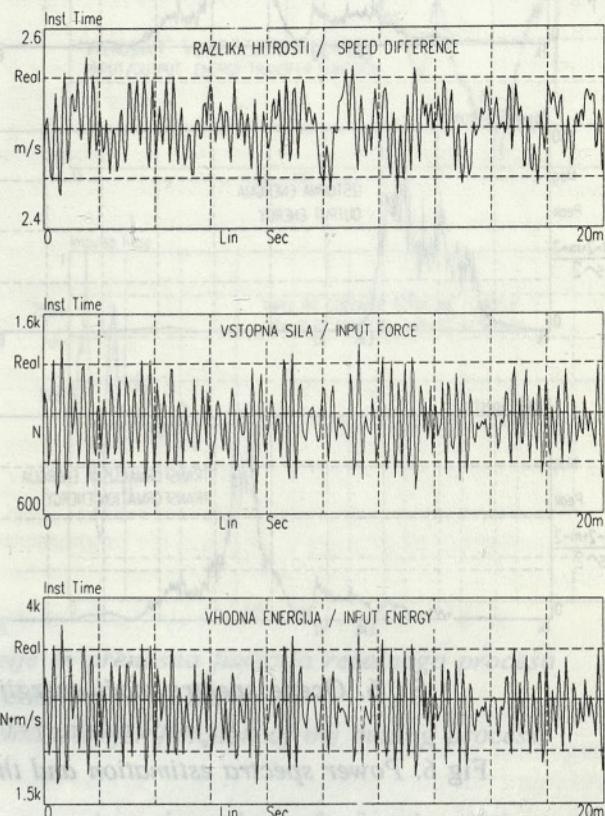
Sl. 5. Časovni potek merjenih parametrov in izračun vstopne energije  
( $v_c = 150 \text{ m/min.}$ ,  $f = 0,193 \text{ mm/vrt.}$ ,  $a_p = 2 \text{ mm}$ )

Fig. 5. Time series of the measured parameters and input energy evaluation

Z analizo naključnih časovno odvisnih zapisov vstopno/izstopnih energij smo ponovno ugotovili njihovo stacionarnost. Določene nestacionarnosti, ki se pojavijo po daljših časih struženja, se kažejo v različnih vrednostih povprečij in varianc. Z analizo časovno krajših zapisov je za oceno spektrov moči in prenosne funkcije procesa mogoče uporabiti običajno hitro Fourierjevo transformacijo. Z ustreznim povprečenjem pa smo dobili tudi zadovoljive amplitudne ocene. Primer ocen spektra moči in avtokorelačijskih funkcij za časovno odvisne zapise različnih energij je prikazan na sliki 6.

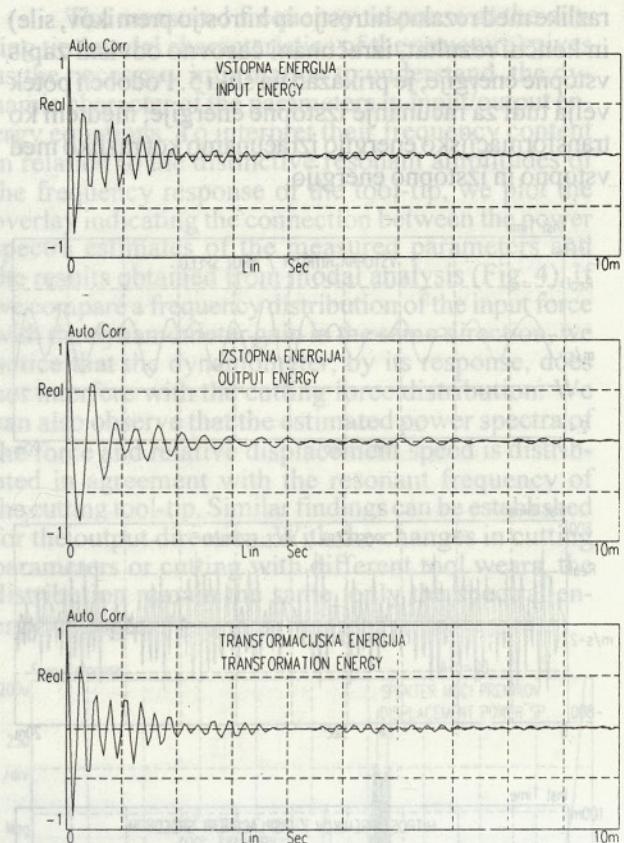
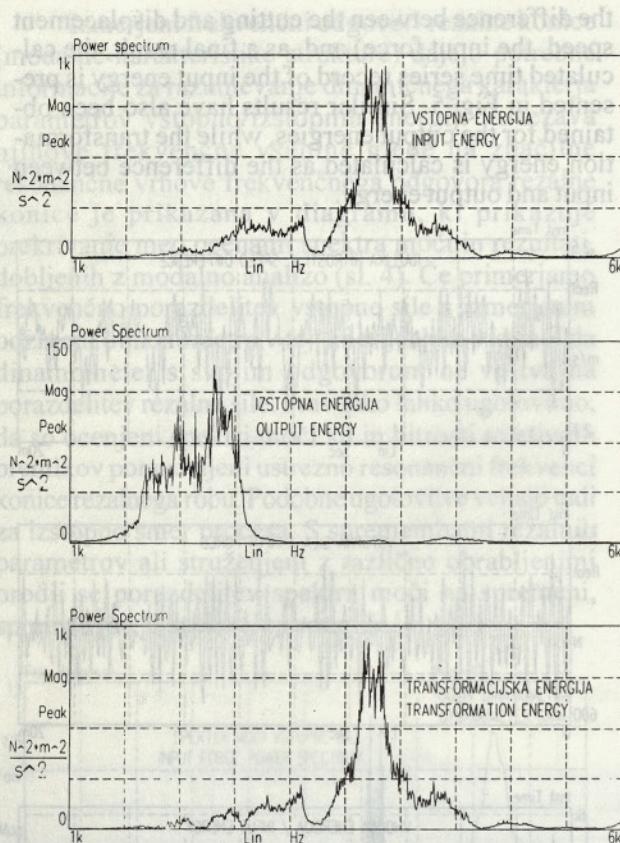
Analiza ocjenjenega spektra moči posameznih energij kaže, da je spekter porazdeljen ustrezno silam ter hitrostim relativnih premikov rezalnega robu. Posamezen zapis pa zopet kaže izrazit amplitudni vrh, ki se ujema z lastno frekvenco rezalne konice glede na opazovano vstopno ali izstopno smer procesa. Določena periodičnost v energijah, povezana s temi resonančnimi vrhovi, se izraža tudi v njihovih avtokorelačijskih funkcijah, velikost dušenja pa kaže

the difference between the cutting and displacement speed, the input force) and, as a final result, the calculated time series record of the input energy is presented in Fig. 5. Similar results have also been obtained for the output energies, while the transformation energy is calculated as the difference between input and output energy.



An analysis of the stochastic time series records of the input/output energies again shows the stationarity of measuring results. Some trends of non-stationarity, which appeared after longer periods of cutting, are reflected as differences in average or variance values. Using short time partitions of the records, the classical Fast Fourier Transform approach proved suitable as a basis for estimating the power spectra of the energies and defining the energy transfer function. By appropriate averaging we also obtained satisfactory amplitude spectral estimations. An example of the estimated power spectra and autocorrelation function for the different energy time series is presented in Figure 6.

An analysis of the estimated power spectrum of particular energies shows that the spectrum is distributed corresponding to the forces and relative velocity tool displacements. Individual records show some distinctive peaks coincidence with the natural frequencies of the tool tip at the observed input and output directions. Also, the autocorrelation analysis expresses a certain periodicity in energies connected with these resonant peaks; its damping values



Sl. 6. Ocene spektra moči energij in njihove avtokorelacijske funkcije

( $v_c = 150 \text{ m/min.}$ ,  $f = 0,193 \text{ mm/vrt.}$ ,  $a_p = 2 \text{ mm}$ )

Fig 6. Power spectra estimation and the autocorrelation function of the energies

na stopnjo naključnosti rezalnega procesa. Spremembe rezalnih pogojev vplivajo značilno na statične in dinamične značilnosti procesa, izraženih prek ustreznih statističnih parametrov. Podrobni rezultati tovrstne analize so prikazani v literaturi [10].

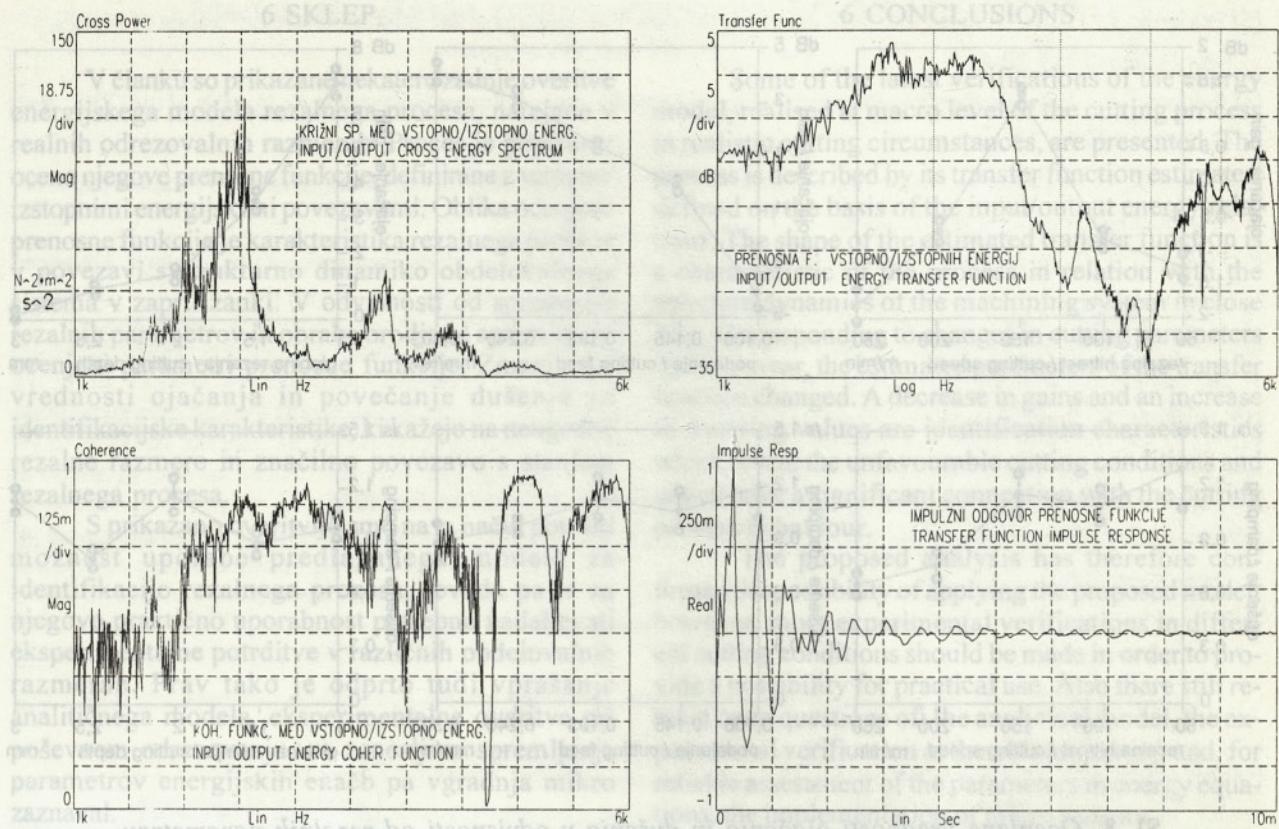
## 5 OCENA PRENOSNE FUNKCIJE REZALNEGA PROCESA

Ocene povprečnih spektrov moči vstopno/izstopnih energij in njihovih avtokorelacijskih funkcij dajejo osnovne informacije o značilnostih rezalnega procesa. Za celovito identifikacijski postopek pa moramo poznati tudi ocene spektralnih povezovalnih funkcij, določenih glede na znane definicije [12]. Kakor je prikazano na sliki 7, kaže ocenjena križna spektralna moč skupni signal v frekvenčnem območju 2 do 2,5 kHz, tu obstajajo tudi dobre koherenčne povezave (med 0,75 in 0,85) in zadovoljiva razmerja signal-šum (med 0,75 in 0,85). Na sliki je prikazan tudi končni rezultat identifikacije, ocenjena prenosna funkcija rezalnega procesa, določena glede na definicijo v enačbi (4) in njeni impulsni prenosni funkciji.

indicate the degree of the stochastic character of the cutting process. Changes in cutting conditions significantly influence the static and dynamic values of particular energy records, expressed by suitable statistical parameters. Detailed results of this analysis are presented in the literature [10].

## 5 TRANSFER FUNCTION ESTIMATES OF THE CUTTING PROCESS

The averaged power spectra of input/output energies and their autocorrelation functions give the basic information about the characteristics of the cutting process. To complete the identification procedure it is necessary to determine also the functions of spectral relations, based on well known definitions [12]. As presented in Fig. 7, the estimated cross power spectra show a common signal component in the frequency range of 2 to 2.5 kHz, where there exist good coherence relationships (between 0.75 to 0.85) and satisfactory signal to noise ratio (between 5 to 10). The picture also shows the final identification result, the estimated transfer function of the cutting process, evaluated according the equation (4) and its impulse response.



Sl. 7. Ocenjene spektralne povezovalne funkcije in prenosna funkcija rezalnega procesa

( $v_c = 150 \text{ m/min.}$ ,  $f = 0,193 \text{ mm/vrt.}$ ,  $a_p = 2 \text{ mm}$ )

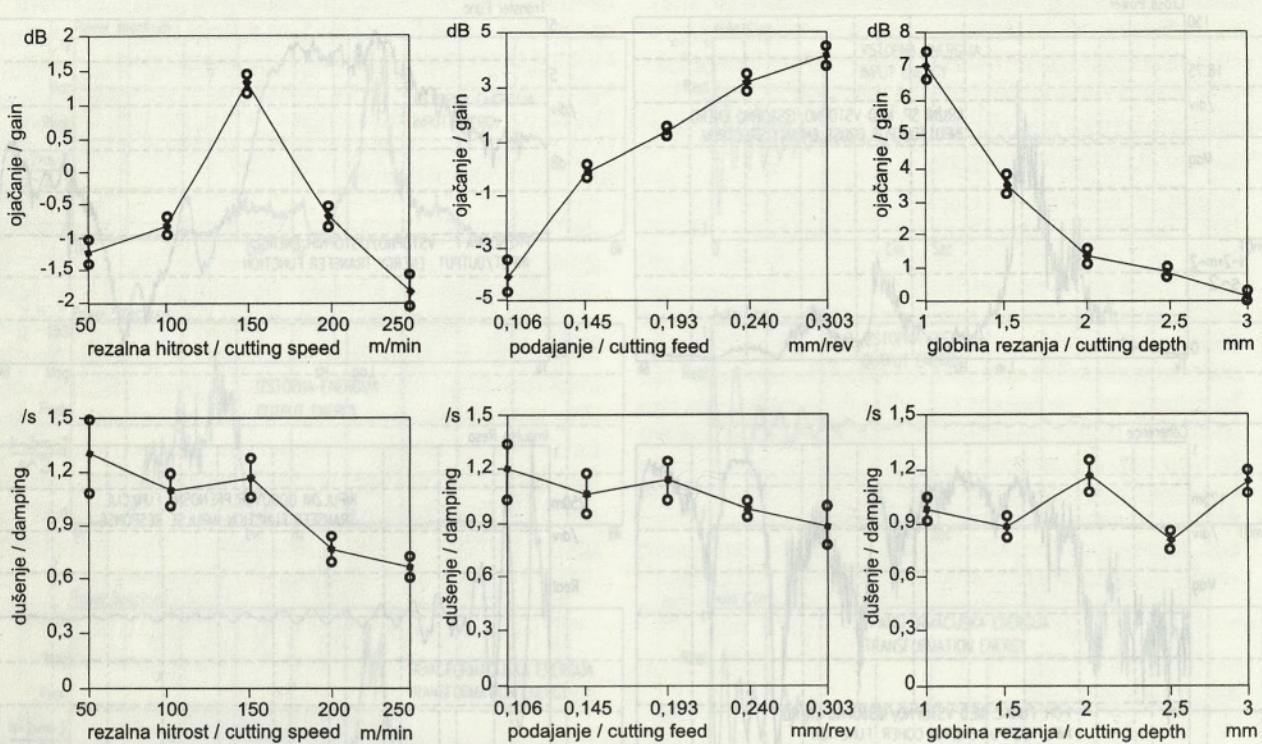
Fig. 7. Estimated related spectral functions and transfer function of the cutting process

Ocenjeno prenosno funkcijo rezalnega procesa lahko analiziramo kakovostno glede na njeno obliko in kolikostno glede na njene parametre. Oblika prenosne funkcije je značilnost procesa v povezavi s struktурno dinamiko obdelovalnega sistema v sklenjeni zanki. V amplitudnih povezavah lahko lociramo določeno izrazito ojačanje v frekvenčnem območju med 2 do 2,3 kHz, ki je posledica rezalnega procesa. Neznačilni amplitudni vrhovi, ki jih lahko opazimo tudi v višjih frekvenčnih območjih, so povezani z večmodalnimi odzvi strukture rezalne konice in dinamometra. Vrednosti dušenja prenosne funkcije dobimo iz njene obratne Fourierjeve transformacije kot faktor dušenja sinusnega valovanja.

Pomembni sklepi, ki izhajajo iz analize tako določene prenosne funkcije so, da se spremembe rezalnih razmer kažejo le v razbranih vrednostih ojačanja in dušenja. Slike 8, na kateri so ocenjene vrednosti ojačanja in dušenja prikazane v odvisnosti od sprememb rezalne hitrosti, podajanja in globine reza, lahko ugotovimo določene statistično značilne razlike. Zato so lahko ti parametri osnova za identifikacijo procesa in kriterij za sprotno prilagajanje rezalnih razmer glede na njihove optimalne vrednosti.

An estimated transfer function of the cutting process could be analysed qualitatively corresponding to its shape, and quantitatively with respect to its parameters. The shape of the transfer function is a characteristic of the process in connection with the structure dynamics of the machining system in a closed loop. In amplitude relationships we can locate some distinctive gain in the frequency region between 2 and 2.3 kHz as a consequence of the cutting process. Insignificant amplitude peaks observed at higher frequencies are those connected with the multimodal responses of the tool-tip and dynamometer. The damping values of the transfer function were obtained from inverse Fourier transform of the transfer function as the damping factor of one-sided sine wave.

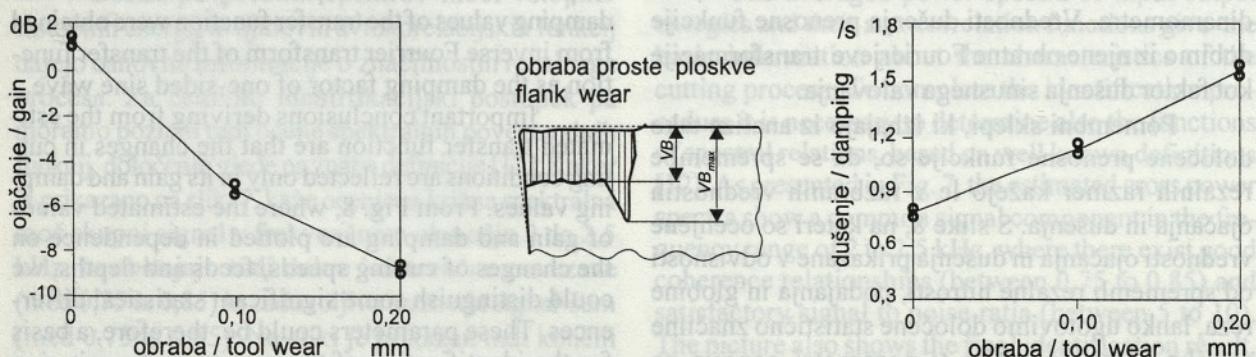
Important conclusions deriving from the estimated transfer function are that the changes in cutting conditions are reflected only in its gain and damping values. From Fig. 8, where the estimated values of gain and damping are plotted in dependence on the changes of cutting speeds, feeds and depths, we could distinguish some significant statistical differences. These parameters could be, therefore, a basis for the identification of the process and a criterion for on-line adaptation of cutting conditions according to optimal cutting circumstances.



Sl. 8. Ocenjene vrednosti ojačanja in dušenja v odvisnosti od rezalnih parametrov  
Fig. 8. Gain and damping values of the transfer function in respect of cutting parameters

Obraba orodja je vsekakor eden od najbolj neugodnih pojavov rezalnega procesa. Rezultati struženja z različno obrabljenim orodjem so prav tako pokazali, da se ocenjeni parametri prenosne funkcije z obrabo značilno spreminjačjo, medtem ko se njena oblika ne spremeni. Slika 9 prikazuje odvisnost ocenjenih vrednosti ojačanja in dušenja prenosne funkcije glede na različno stopnjo obrabe orodja. Zmanjševanje ojačanja in povečevanje dušenja so torej identifikacijske karakteristike, ki so v povezavi z neugodnimi rezalnimi razmerami. To dejstvo potrjuje ustreznost tovrstnega identifikacijskega postopka, rezultati, dobavljeni v realnih rezalnih razmerah, pa mu dajejo tudi praktično vrednost.

Tool wear is certainly one of the most unfavourable phenomena in cutting processes. The results in turning with a worn tool also indicated the significant changes in the estimated parameters of the transfer function, while its shape remains unchangeable. Fig. 9 shows the relation of the estimated parameters of the transfer function to the different tool wears. A decrease in gains and an increase in damping values are the identification characteristics connected with the unfavourable cutting conditions. This fact confirms the relevance of such as identification procedure; the results obtained in real cutting circumstances also reflect its practical values.



Sl. 9. Ocenjene vrednosti ojačanj in dušenja v odvisnosti od obrabe orodja  
Fig. 9. Gain and damping values of the transfer function for different tool wears

## 6 SKLEP

## 6 CONCLUSIONS

V članku so prikazane nekatere zadnje overitve energijskega modela rezalnega procesa, narejene v realnih odrezovalnih razmerah. Proses je popisan z oceno njegove prenosne funkcije, definirane z vstopno/izstopnimi energijskimi povezavami. Oblika ocenjene prenosne funkcije je karakteristika rezalnega procesa v povezavi s struktурno dinamiko obdelovalnega sistema v zaprti zanki. V odvisnosti od sprememb rezalnih parametrov in obrabe orodja se spreminjajo ocenjeni parametri prenosne funkcije. Zmanjšanje vrednosti ojačanja in povečanje dušenja so identifikacijske karakteristike, ki kažejo na neugodne rezalne razmere in značilno povezavo s stanjem rezalnega procesa.

S prikazano overitvijo smo na ta način potrdili možnost uporabe predlaganega modela za identifikacijo rezalnega procesa, seveda pa je za njegovo praktično uporabnost potrebno nadaljevati eksperimentalne potrditve v različnih obdelovalnih razmerah. Prav tako je odprto tudi vprašanje analitičnega modela, eksperimentalne overitve pri poševnem odrezovanju, za zanesljivo spremeljanje parametrov energijskih enačb pa vgradnja mikro zaznaval.

## ZAHVALA

Prispevek je povzetek iz raziskav v okviru doktorskega študija in nekaterih kasnejših potrditev. Rad bi se zahvalil mentorju, prof. J. Pekleniku, za dano priložnost raziskovati tako zanimivo področje ter za njegovo vsesplošno podporo. Prav tako se želim zahvaliti sodelavcem iz laboratorija za odrezavanje za tehnično pomoč, Ministrstvu za znanost in tehnologijo Slovenije za finančno podporo in tovarni Sandvik Coromant za podarjena orodja.

Some of the latest verifications of the energy model, realised at macro level of the cutting process in realistic cutting circumstances, are presented. The process is described by its transfer function estimates, defined on the basis of the input/output energy relations. The shape of the estimated transfer function is a characteristic of the process in relation with the structure dynamics of the machining system in close loop. Corresponding to changes in cutting parameters and tool wear, the estimated parameters of the transfer function changed. A decrease in gains and an increase in damping values are identification characteristics which reveal the unfavourable cutting conditions and which have a significant connection with the cutting process behaviour.

The proposed analysis has therefore confirmed the possibility of applying the proposed model; however, more experimental verifications in different cutting conditions should be made in order to provide a possibility for practical use. Also there still remain open questions of: the analytical model, the experimental verification at the oblique cutting and, for reliable assessment of the parameters in energy equations, the implementation of micro sensors.

## ACKNOWLEDGEMENTS

This paper originates from research made for my doctoral thesis, with some later verifications. I would like to thank my mentor, Prof. J. Peklenik, who gave me the opportunity to work on such an interesting domain and who offered me all support. I am also most grateful to colleagues from the Laboratory for cutting, for helping me in the technical work; to the MST Slovenia for financial support; and the Sandvik Coromant for the supply of tools.

## 7 LITERATURA

## 7 REFERENCES

- [1] Byrne, G., D. Dornfeld, I. Inasaki, G. Ketteler, R. Teti: Tool condition monitoring, the status of research and industrial application. Annals of the CIRP, Vol. 44, 1995/2, 24-41.
- [4] Peklenik, J.: Complexity in manufacturing systems. Manufacturing Systems. Proceedings of the CIRP Seminars, Vol. 24, 1995/1, 17-25.
- [3] Peklenik, J., T. Mosedale: A statistical analysis of the cutting system based on an energy principle. Proceedings of the 8<sup>th</sup> International MTDR Conference, Manchester, 1967, 209-231.
- [4] Mosedale, T.W., J. Peklenik: An analysis of the transient cutting energies and the behaviour of the metal-cutting system using correlation techniques. Advanced in Manufacturing Systems, Vol. 19, 1971/3, 111-141.

- [5] Peklenik, J., I. Žun: Surface interface in cutting process. Proceedings of the International Conference of Metals, New Orleans 1985, 20-47.
- [6] Peklenik, J., A. Jerele: Some basic relationship for identification of the machining process. Annals of the CIRP, Vol. 41, 1992/1, 129-136.
- [7] Dolinšek, S., J. Peklenik: An on-line estimation of the transfer function for the cutting process. Technical paper of NAMRI/SME, Vol. 27, 1996/1, 34-40.
- [8] Dolinšek, S.: Transfer function of the cutting process based on energy relations - some recent verifications. Advanced Manufacturing Systems and Technology, Edited E. Kuljanić, Springer Verlag, Wien 1996, 129-136.
- [9] Merchant, M.E.: Mechanics of the metal cutting process. Journal of Applied Physics, Vol. 16, 1945/3, 267-275.
- [10] Dolinšek, S.: Sprotna identifikacija rezalnega procesa na makro nivoju. Doktorska disertacija, Univerza v Ljubljani, FS b n 1995.
- [11] Ewins, D.J.: Modal testing - theory and practice. John Wiley & Sons, London, 1984.
- [12] Bendat, J., A. A. Piersol: Engineering applications of correlation and spectral analysis. John Wiley and Sons Ltd, New York, 1980.

Avtorjev naslov: dr. Slavko Dolinšek, dipl. inž.  
Univerza v Ljubljani  
Fakulteta za strojništvo  
Aškerčeva 6  
1000 Ljubljana

Author's Address: Dr. Slavko Dolinšek, Dipl. Ing.  
University of Ljubljana  
Faculty of Mechanical Engineering  
Aškerčeva 6  
1000 Ljubljana, Slovenia

Obravnavana je problematika rezanja s poudarkom na najbolj neugodnih pojavov rezalnega procesa. Rezultati stvarjeni z razloženo obravnavanjem problemov so pre takoj posredno uporabni pri izračunu rezalne funkcije. Posledično se določajo optimizacijski parametri.

Tool wear is considered one of the most unfavourable phenomena in cutting processes. The results in turn can be directly used for calculating the cutting function. Consequently, optimization parameters are determined.

Tool wear is considered one of the most unfavourable phenomena in cutting processes. The results in turn can be directly used for calculating the cutting function. Consequently, optimization parameters are determined.

Prejeto:  
Received: 17.2.1997

Sprejeto:  
Accepted: 30.4.1997

rezalna funkcija, rezalni parametri, rezalni rezultati, določanje v realnih rezultatih, rezalna pravila, dajejo tudi praktično vrednost.

Tool wear is considered one of the most unfavourable phenomena in cutting processes. The results in turn can be directly used for calculating the cutting function. Consequently, optimization parameters are determined.

