

<https://doi.org/10.24867/JPE-1993-10-109>

STRUČNI RAD

Milikić D., Gostimirović M\*., Ilić B.\*\*

**PROJEKTOVANJE OBLIKA I DIMENZIJA POJAČIVAČA  
ULTRAZVUČNIH OSCILACIJA PRIMENOM RAČUNARA**

**SHAPE AND DIMENSIONS PROJECTION OF ULTRASONIC  
VIBRATIONS CONCENTRATORS BY COMPUTER**

**S u m m a r y**

*Oscillations of tool during ultrasonic machining tool realized by current of high frequency, are transformed through oscillation system in the mechanical vibrations with amplitude highness which is suitable for machining. For increasing of longitudinal vibrations amplitude on the tool, ultrasonic amplifiers concentrators are used. Function of amplitude amplification is realized by concentrator cross section and shape change. Basic shapes of concentrators used in production practice are: cylindric in steps, catenoid, exponetiol and conic.*

*In the paper problems connectic with calculation of ultrasonic vibrations concentrators by computer are presented. Calculations are based on laws of sonic waves expose through solid bodies and solving differential equations of basic shapes of concentrators. To be subject to shape of concentrators and cross section change, lot of complicated equations are obtained. Without computer solving of this equations would by extremely long and unprecision.*

*Developed program system based on interaction between computer and user gives opportunity for projection of shape and dimensions of ultrasonic concentrators, selection of most convenient type for given conditions and calculation of all parameters necessary for manufacture.*

---

\* Milikić dr Dragoje, red.prof., Gostimirović mr Marin, ass., Institut za proizvodno mašinstvo, FTN, Novi Sad, Trg D. Obradovića 6

\*\* Ilić Boško, dipl.ing.

## Rezime

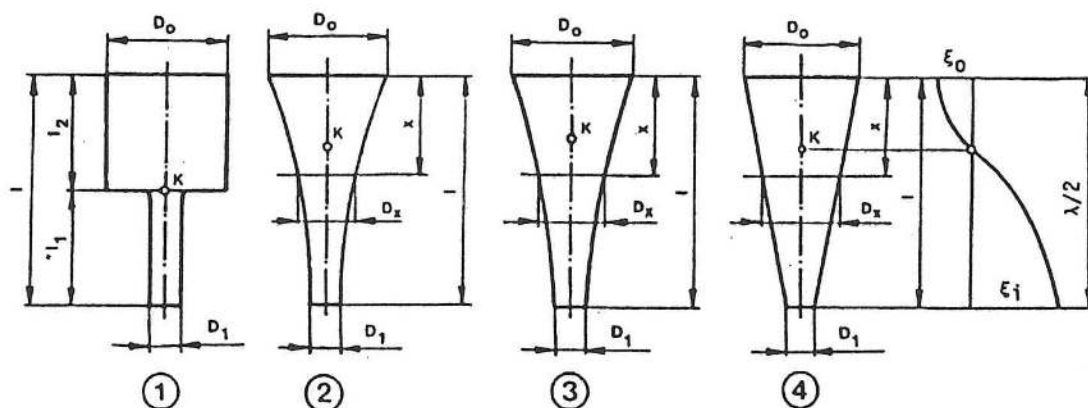
U radu je izložena problematika vezana za proračun koncentratora ultrazvučnih oscilacija primenom računara. Proračun je zasnovan na zakonima prostiranja zvučnih talasa kroz čvrsta tela i rešavanju diferencijalnih jednačina oscilovanja za četiri osnovna oblika koncentratora: stepenasti, katenoidni, eksponencijalni i konični. Razvijeni programski sistem na bazi interaktivnog rada između računara i korisnika omogućava efikasno projektovanje oblika i dimenzija ultrazvučnih koncentratora, izbor najpogodnijeg tipa za date uslove obrade i izračunavanje svih veličina potrebnih za njegovu izradu.

## 1. UVOD

Ultrazvučnim metodama obrade nazivaju se svi tehnološki procesi i operacije u kojima se proces obrade odvija uz prisustvo mehaničkih oscilacija sa frekvencijama ultrazvučnog područja. Izdvajaju se procesi obrade abrazivom slobodnog kretanja (čišćenje i poliranje), intenziviranje ostalih procesa obrade i dimenzionalna obrada ultrazvukom. Najširu primenu ima dimenzionalna obrada gde se rezni elementi abrazivnih zrna, pod udarcima alata koji osciluje u pravcu ose ultrazvučnom frekvencijom, utiskuju u materijal obradka.

Oscilovanje alata se ostvaruje tako što se električna struja visoke učestalosti posredstvom oscilatornog sistema pretvara u mehaničke vibracije veličine amplitude koja je pogodna za dimenzionalnu obradu. Za povećanje amplitude uzdužnih oscilacija na alatu primenjuju se ultrazvučni pojačivači - koncentratori. Funkcija pojačanja amplitude ostvaruje se promenljivim poprečnim presekom i oblikom koncentratora. Najvažnija karakteristika koncentratora je njegov koeficijent pojačanja ( $K_p$ ) koji pokazuje koliko puta je veća izlazna amplituda ( $\xi_1$ ) od ulazne ( $\xi_0$ ).

Osnovni oblici koncentratora koji se koriste u praksi su: stepenasti, katenoidni, eksponencijalni i konični (sl.1.).



Sl.1. Osnovni oblici pojačivača ultrazvučnih oscilacija - koncentratora

Fig.1. Basic shapes of ultrasonic vibrations concentrators

## 2. PRORAČUN DIMENZIJA OSNOVNIH OBLIKA KONCENTRATORA

Proračun ultrazvučnih koncentratora zasnovan je na zakonima prostiranja zvučnih talasa kroz čvrsta tela. Tok proračuna zavisi od ulaznih parametara procesa obrade i postavljenih graničnih uslova.

Ako se jedna tačka elastične sredine izvede iz ravnotežnog položaja počee da osciluje uz prenošenje energije oscilovanja na svoju okolinu. Diferencijalna jednačina oscilovanja za prostiranje ravnih harmonijskih longitudinalnih (uzdužnih) talasa kroz koncentrator promenljivog poprečnog preseka ima sledeći oblik.

$$\frac{d^2\xi}{dx^2} + \frac{1}{S} \frac{dS}{dx} \frac{d\xi}{dx} + k^2\xi = 0 \quad (1)$$

gde je:  $\xi$  - udaljenost oscilujuće materijalne tačke od ravnotežnog položaja (amplituda)  
 $x$  - kordinata duž ose po kojoj se vrši promena poprečnog preseka koncentratora  
 $S$  - površina poprečnog preseka koncentratora

$$k = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi f}{c} = \frac{2\pi}{\lambda}$$

$f$  - frekvencija oscilovanja  
 $c$  - brzina prostiranja zvučnih talasa kroz materijal koncentratora  
 $\lambda$  - talasna dužina

Rešenje diferencijalne jednačine (1) zavisi od oblika koncentratora, tj. od zakona promene poprečnog preseka koncentratora. Zakoni promene poprečnog preseka, rešenja diferencijalne jednačine (1) i osnovne formule koje karakterišu četiri osnovna tipa koncentratora dati su u tablici 1.

Pri prostiranju zvučnih talasa kroz materijal koncentratora, zbog prenosa energije, dolazi do mehaničkog naprezanja koncentratora. Promena normalnog napona ( $\sigma$ ) može se preko Hukovog zakona izraziti u sledećem obliku:

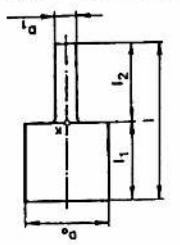
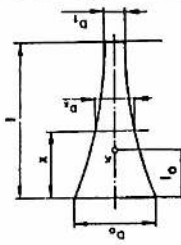
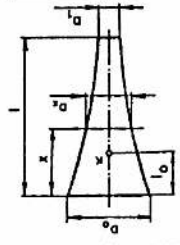
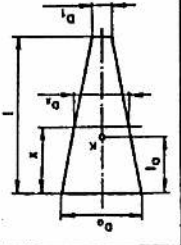
$$\sigma = E\varepsilon = E \frac{d\xi}{dx} \quad (2)$$

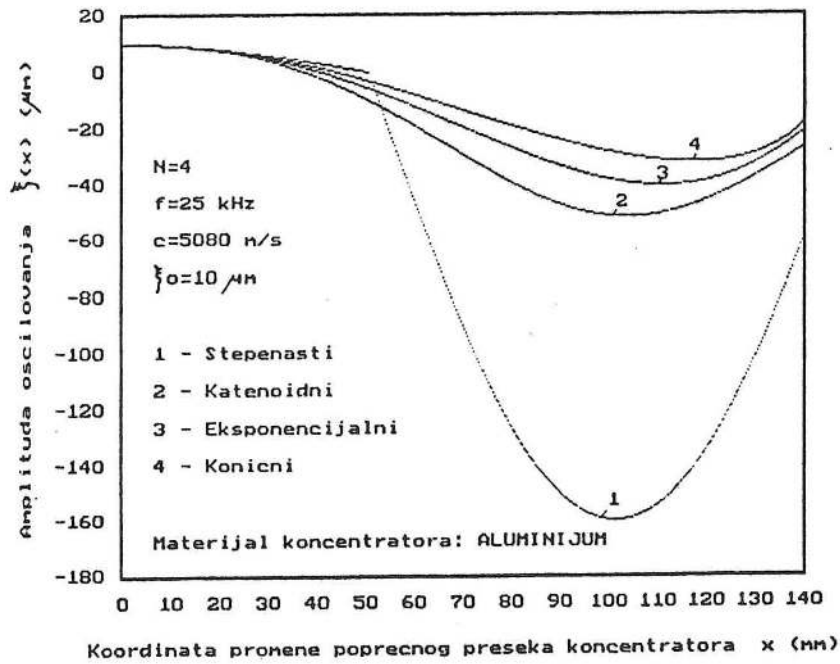
gde je:  $E$  - modul elastičnosti materijala koncentratora  
 $\varepsilon$  - elastična deformacija

Rešenje jednačine (2) za zakonitosti promene amplitude oscilovanja  $\xi(x)$  četiri tipa koncentratora, prikazana su u istoj tablici 1.

Grafički prikaz promene amplitude oscilovanja  $\xi(x)$  i normalnog napona  $\sigma(x)$  duž ose po kojoj se vrši promena poprečnog preseka koncentratora, za usvojeni primer obrade, prikazani su na sl.2 i sl.3.

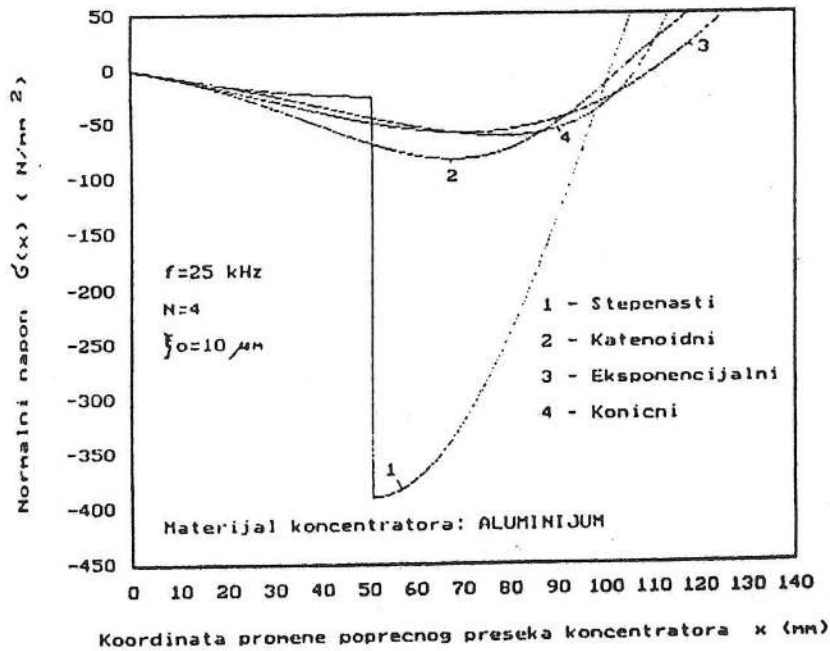
TABLICA 1. KARAKTERISTIČNE FORMULE OSNOVNIH OBLIKA KONCENTRATORA

TIP KONCENTRATORA	ZAKON PROMENE POPREČNOG PRESEKA S(x)	ZAKON PROMENE AMPLITUDE OSCILOVANJA ξ(x)	KOEF. POJAČ. AMPLITUDE OSCILOVANJA K <sub>p</sub>	DUŽINA KONCENTRATORA POLOŽAJ OSCILATORNOG CVORA l/l <sub>0</sub>	ZAKON PROMENE NORMALNOG NAPONA σ(x)
<b>STEPENAST</b> 	$S(x) = \text{const.}$ $D_x = D_0 \quad x \in [0, l_1]$ $D_x = D_1 \quad x \in [l_1, l_2]$	$l_1 = l_2:$ $\xi(x) = -\xi_0 \cdot \sin(kx) \quad x \in [0, l_1]$ $\xi(x) = -N^2 \cdot \xi_0 \cdot \sin(kx) \quad x \in [l_1, l_2]$ $k = 2\pi / \lambda$	$K_p = N^2$ $N = D_0 / D_1$	$l = c / (2 \cdot \pi \cdot f)$ $l_1 = l_2 = l / 2$ $l_0 = l / 2$	$\sigma(x) = -k \cdot E \cdot \xi_0 \cdot \cos(kx) \quad x \in [0, l_1]$ $\sigma(x) = -N^2 \cdot k \cdot E \cdot \xi_0 \cdot \cos(kx) \quad x \in [l_1, l_2]$
<b>KATENOIDAN</b> 	$S(x) = S_0 \cdot \text{sh}^2(\gamma(1-x))$ $D_x = D_1 \cdot \text{ch}(\gamma(1-x))$ $\gamma = \frac{1}{f} \cdot \text{Arccch}(N)$	$\xi(x) = \xi_0 \frac{\text{ch}(\gamma l)}{\text{ch}(\gamma(1-x))} (\cos(kix)) -$ $- \frac{\gamma}{k_1} \cdot \text{th}(\gamma l) \cdot \sin(kix)$ $k_1 = \sqrt{k^2 - \gamma^2}$	$K_p = \left  \frac{N}{\cos(\phi)} \right $ $(K_p > N)$	$l = \frac{c}{2 \cdot \pi \cdot f} \cdot \sqrt{\phi^2 + \text{Arccch}^2(N)}$ $\phi = \arccos \left( \frac{\sqrt{N^2 - 1}}{N \cdot \text{tg}(\phi)} \right)$ $l_0 = \frac{1}{k_1} \cdot \text{arctg} \left( \frac{k_1}{\gamma} \cdot \text{cth}(\gamma l) \right)$	$\sigma(x) = \frac{E \cdot \xi_0 \cdot \text{ch}(\gamma l)}{\text{ch}(\gamma(1-x))} \left[ \gamma \cdot \text{th}(\gamma(1-x)) \cdot (\cos(kix)) - \right.$ $- \frac{\gamma}{k_1} \cdot \text{th}(\gamma l) \cdot \sin(kix) - k_1 \cdot \sin(kix) -$ $\left. - \gamma \cdot \text{th}(\gamma l) \cdot \cos(kix) \right]$
<b>EKSPONENCIJALAN</b> 	$S(x) = S_0 \cdot e^{-2 \cdot \beta \cdot x}$ $D_x = D_0 \cdot e^{-\beta \cdot x}$ $\beta = \frac{1}{f} \cdot \ln(N)$	$\xi(x) = \xi_0 \cdot e^{\beta \cdot x} (\cos(kix)) -$ $- \frac{\beta}{k_1} \cdot \sin(kix)$ $k_1 = \sqrt{k^2 - \beta^2}$	$K_p = N$ $N = D_0 / D_1$	$l = \frac{c}{2 \cdot \pi \cdot f} \cdot \sqrt{\pi^2 + \ln^2(N)}$ $l_0 = \frac{1}{k_1} \cdot \text{arctg} \left( \frac{k_1}{\beta} \right)$	$\sigma(x) = - \frac{E \cdot \xi_0 (\beta^2 + k_1^2)}{k_1} \cdot e^{\beta \cdot x} \sin(kix)$
<b>KONIČAN</b> 	$S(x) = S_0 \cdot (1 - \alpha \cdot x)^2$ $D_x = D_0 \cdot (1 - \alpha \cdot x)$ $\alpha = \frac{D_0 - D_1}{D_0 \cdot l}$	$\xi(x) = \xi_0 \frac{1}{1 - \alpha \cdot x} (\cos(kix)) -$ $- \frac{\alpha}{k} \cdot \sin(kix)$ $k = 2\pi / \lambda$	$K_p = \sqrt{1 + \gamma^2}$	$l = \frac{c}{2 \cdot \pi \cdot f} \cdot \tau$ $\text{tg}(\tau) = \frac{\tau}{\tau^2 \cdot N + 1}$ $l_0 = \frac{1}{k} \cdot \text{arctg} \left( \frac{k}{\alpha} \right)$	$\sigma(x) = \frac{E \cdot \xi_0}{(1 - \alpha \cdot x)^2} \left[ \alpha^2 \cdot x \cdot \cos(kix) - \right.$ $\left. - \frac{(\alpha^2 + k^2 - \alpha \cdot k)}{k} \cdot \sin(kix) \right]$



Sl.2. Promena amplitude oscilovanja ( $\xi$ ) duž promene poprečnog preseka koncentratora ( $x$ )

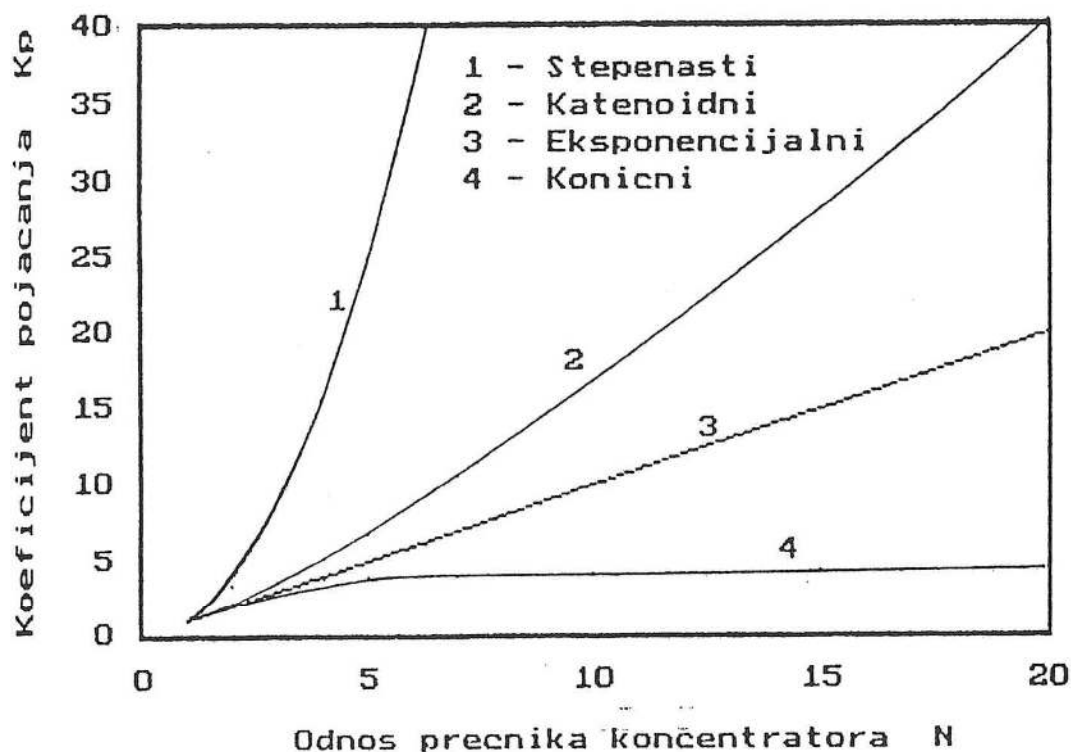
Fig.2. Oscillation amplitude change ( $\xi$ ) along the cross section of concentrator ( $x$ )



Sl.3. Promena normalnog napona ( $\sigma$ ) duž promene poprečnog preseka koncentratora ( $x$ )

Fig.3. Normal stress change ( $\sigma$ ) along the cross section of concentrator ( $x$ )

Na osnovu prethodno izvedenih relacija za pojedine tipove koncentratora, može se dijagramski predstaviti zavisnost koeficijenta pojačanja amplitude oscilovanja ( $K_p = \xi_1 / \xi_0$ ) od odnosa prečnika ( $N = D_0 / D_1$ ), sl.4. Realne vrednosti koeficijenta  $K_p$  su nešto niže od proračunatih zbog pojava gubitaka u materijalu koncentratora.



Sl.4. Zavisnost koeficijenta pojačanja amplitude oscilovanja ( $K_p$ ) od odnosa prečnika ( $N$ )

Fig.4. Dependence of amplitude amplification coefficients ( $K_p$ ) and diameter ratio ( $N$ )

Sa dijagrama (Sl.4.) se vidi da najveći koeficijent pojačanja za određeni odnos prečnika ima stepenasti koncentrator. Međutim, zbog velike koncentracije napona na mestima smanjenja poprečnog preseka i pojave poprečnih oscilacija, stepenasti koncentrator se koristi kod instalacija manjeg kapaciteta i za vrednosti odnosa prečnika  $N \leq 4$ . Katenoidni i eksponencijalni koncentrator imaju relativno veliki koeficijent pojačanja uz visoku stabilnost pri radu. Konični koncentrator je proste konstrukcije, ima najmanji koeficijent pojačanja i neelishodna je njegova primena za  $N > 5$  jer se iznad ove vrednosti koeficijent  $K_p$  neznatno povećava.

### 3. RAZVOJ PROGRAMSKOG SISTEMA ZA PROJEKTOVANJE OBLIKA I DIMENZIJA KONCENTRATORA

Proračun ultrazvučnih koncentratora na osnovu obrazaca iz tablice 1, zbog velikog broja i relativne složenosti navedenih formula, veoma je prikladan za računarsku obradu. Uz to, rešavanje transcendentnih jednačina bez primene računara je izrazito neprecizno.

Koristeći mogućnosti koje pruža savremeni PC računar razvijen je programski sistem koji na bazi interaktivnog rada između računara i korisnika omogućuje projektovanje oblika i dimenzija pojačivača ultrazvučnih oscilacija. Programski sistem, čiji je algoritam prikazan na sl.5, omogućuje:

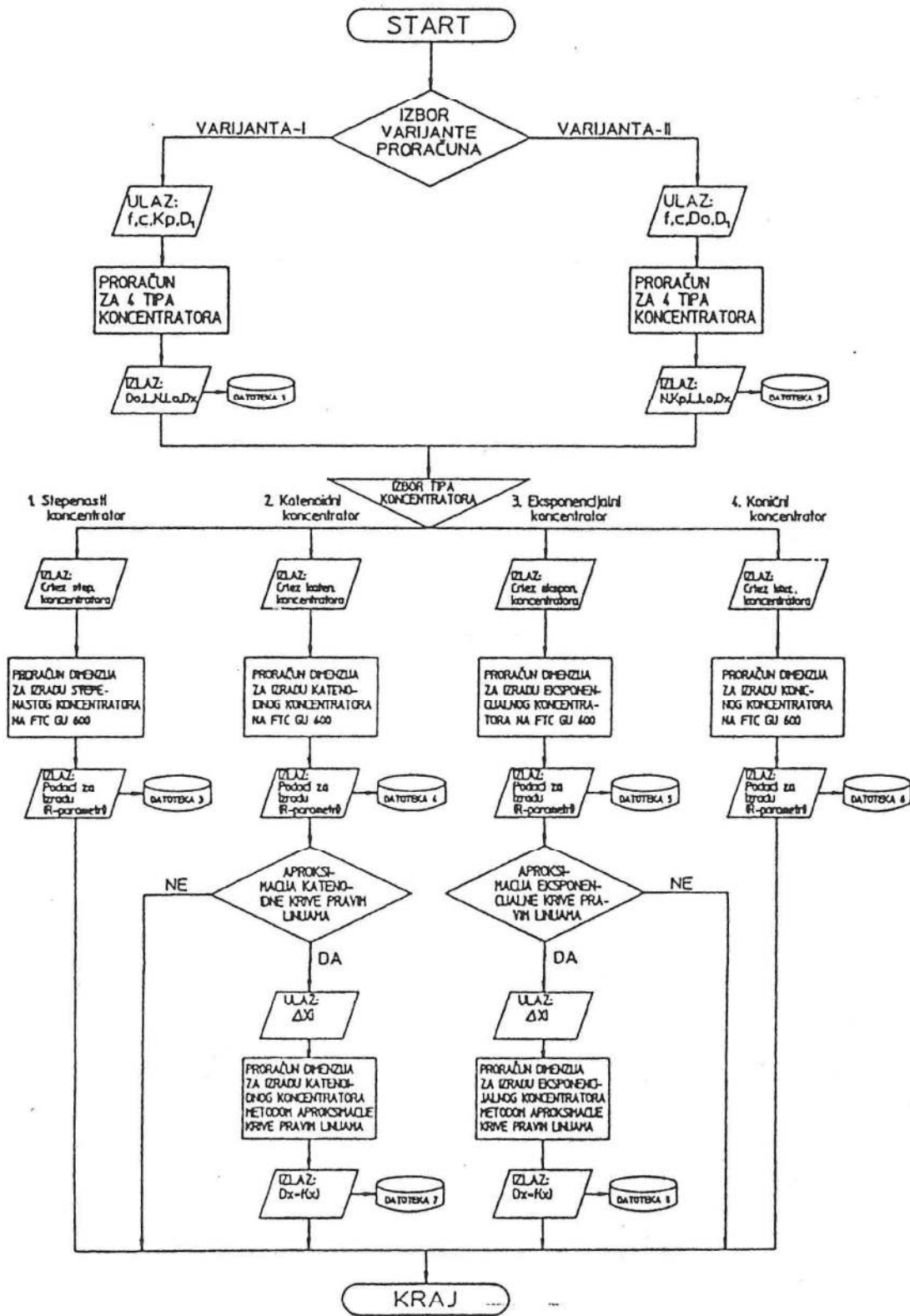
- dve varijante proračuna dimenzija četiri osnovna tipa koncentratora u zavisnosti od ulaznih podataka;
- ispisivanje preporuka za ulazne veličine prilikom njihovog unošenja;
- uporedni prikaz izlaznih rezultata proračunatih koncentratora i njihovih crteža u odgovarajućoj razmeri radi lakšeg izbora najpovoljnijeg tipa;
- brzo i efikasno izračunavanje svih parametara potrebnih za izradu koncentratora metodom parametarskog programiranja na NC mašinama ili metodom aproksimacije krivih koncentratora pravim linijama i
- memorisanje i štampanje svih izlaznih rezultata.

Primer odštampanih izlaznih rezultata proračuna dimenzija koncentratora i podataka potrebnih za njihovu izradu, dat je na sl.6.

### 4. ZAKLJUČCI

Na osnovu izloženog može se zaključiti sledeće:

- Pojačivači ultrazvučnih oscilacija imaju važnu ulogu pri dimenzionalnoj ultrazvučnoj obradi jer direktno utiču na proizvodnost, tačnost, kvalitet obrade, stabilnost rada i dr.
- Proračun ultrazvučnih koncentratora zasnovan je na zakonima prostiranja zvučnih talasa kroz čvrsta tela i rešavanju diferencijalnih jednačina oscilovanja.
- Razvijeni programski sistem za projektovanja oblika i dimenzija koncentratora daje tačno, brzo i efikasno rešenje.
- Izlazni rezultati omogućuju izbor najpovoljnijeg tipa koncentratora za date uslove obrade i mogućnost njegove jednostavne izrade metodom parametarskog programiranja na NC mašinama alatkama.



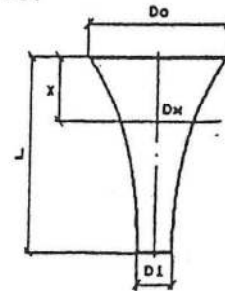
Sl.5. Algoritam programskog sistema za projektovanje oblika i dimenzija koncentratora

Fig.5. Model of the programming system for shape and dimension projection



KATENOIDNI KONCENTRATOR

FTN NOVI SAD Institut za proizvodno masinstvo	Radne karakteristike:
KARAKTERISTIKE ULTRAZVUCNOG POJACI - KONCENTRATORA DOBIJENE PRORACUNOM SISTEMU "PROKON"	$f = 25.000$ (kHz)
	$c = 5050.000$ (m/s)
	$Kp = 5.000$ (-)
	$N = 3.911$ (-)
ULAZNI PODACI:	Geometrijske velicine:
1. $f = 25.000$ (kHz)	$Do = 78.221$ (mm)
2. $c = 5050.000$ (m/s)	$D1 = 20.000$ (mm)
3. $Do = 60.000$ (mm)	$L = 103.970$ (mm)
4. $D1 = 15.000$ (mm)	$Dx = D1 \cdot ch(a(L-x))$ (mm)
	$a = 0.01981$
IZLAZNI PODACI:	Duzina na kojoj je amplituda oscilovanja jednaka nuli:
	$Lo = 37.999$ (mm)



Reznica:  
1 : 2

	STEPENASTI	KATENOIDNI	EKSPONENCIJALNI	KONICNI
$N$ (-)	4.000	4.000	4.000	4.000
$Kp$ (-)	16.000	5.147	4.000	3.758
$L$ (mm)	101.600	103.864	111.052	117.137
$Lo$ (mm)	50.800	37.514	40.836	44.197

Zakon promene poprečnog preseka koncentratora u zavisnosti od duzine $x$ :		PODACI ZA IZRADU KATENOIDNOG KONCENTRATORA METODOM APROKSIMACIJE KATENOIDNE KRIVE PRAVIM LINIJAMA:	
	$x$ (mm)	$Do$ (mm)	$Dx$ (mm)
1. Stepenasti koncentrator: $L1 = 50.800$ (mm) $L2 = 50.800$ (mm)			
2. Katenoidni koncentrator: $Dx = 15.000 \cdot ch(0.01987(103.864 - x))$	0.000	60.000	60.000
3. Eksponencijalni koncentrator: $Dx = 60.000 \cdot exp(-0.01248x)$	5.000	54.516	54.516
4. Konicni koncentrator: $Dx = 50.000(1 - 0.00648x)$ (mm)	10.000	49.570	49.570
	15.000	45.114	45.114
	20.000	41.104	41.104
	25.000	37.499	37.499
	30.000	34.265	34.265
	35.000	31.369	31.369
	40.000	28.782	28.782
$f$ - rezonantna frekvencija oscilovanja	45.000	26.480	26.480
$c$ - brzina prostiranja zvučnih talasa kroz materijal	50.000	24.440	24.440
$Kp$ - koefi	55.000	22.641	22.641
$N$ - odnos	60.000	21.065	21.065
$Do$ - gornj	65.000	19.698	19.698
$D1$ - donji	70.000	18.525	18.525
$L$ - duzin	75.000	17.534	17.534
$Lo$ - resto	80.000	16.718	16.718
na ko	85.000	16.066	16.066
	90.000	15.573	15.573
	95.000	15.233	15.233
	100.000	15.044	15.044
	105.000	15.004	15.004
PODACI ZA IZRADU KATENOIDNOG KONCENTRATORA NA STRUGU BU 600 METODOM PARAMETARSKOG PROGRAMIRANJA ( R - parametri ):			
$R00 =$	60.000	$R11 =$	62.318
$R01 =$	103.864	$R12 =$	223.352
$R02 =$	16.296	$R13 =$	30.312
$R03 =$	20.773	$R14 =$	40.521
$R04 =$	333.388	$R15 =$	83.091
$R05 =$	0.000	$R16 =$	167.297
$R06 =$	20.406	$R17 =$	38.929
$R07 =$	41.545	$R18 =$	129.052
$R08 =$	287.262	$R19 =$	47.838
$R09 =$	17.934	$R20 =$	15.000
$R10 =$	28.042		

Sl.6. Primeri izlaznih rezultata proračuna dimenzija koncentratora i podataka potrebnih za njihovu izradu

Fig.6. Example of the exit results of concentrators dimension calculation and data necessary for manufacture

## LITERATURA

- [ 1 ] Markov A.I.: Ultrazvukovaja obrabotka materialov, Mašinstroenie, Moskva, 1980.
- [ 2 ] Paulescu GH., Nanu A.: Studiul influentei formei concentratoarelor ultrasonice asupra parametrilor acustici si tehnologici la prelucrarea prin eroziuneultrasonica, Tehnologiile neconventionale simpozion, Timisoara, 1986., str. 141-148.
- [ 3 ] Hodolić J., Gatalo R., Živanović M., Jandrić Ž.: Prilog uporednoj analizi metoda programiranja fleksibilnih tehnoloških struktura (FTS), 24. Savetovanje proizvodnog mašinstva Jugoslavije, Zb. radova III, Novi Sad, 1992., str. 215-224.
- [ 4 ] Ilić B.: Projektovanje dimenzija i tehnologije izrade pojačivača ultrazvučnih oscilacija primenom računara, Diplomski rad, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 1992.
- [ 5 ] Milikić D.: Nekonvencionalni postupci obrade, Udžbenik u rukopisu, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 1993.