

MODELAREA FUNCȚIONĂRII UNUI LANȚ ULTRASONIC CARE INTEGRĂZĂ SCULA UTILIZAT LA FINISAREA ELECTROEROZIVĂ

NICOLESCU Mădălina¹, RĂUȚĂ George¹ și RISTEA Radu¹

Conducător științific: Prof.dr.ing. **Daniel GHICULESCU**

REZUMAT: Se modelează cu Metoda Elementelor Finite (MEF) un concentrator ultrasonic care integrează scula utilizată la finisarea prin electroeroziune (EDM). Acest concentrator face parte dintr-un lanț ultrasonic prin care se urmărește creșterea performanțelor tehnologice la finisarea EDM. Rezultatele obținute în urma modelării cu MEF au condus la realizarea efectivă a concentratorului ultrasonic care funcționează în condiții de rezonanță. În timpul prelucrării scula se uzează și produce modificarea frecvenței proprii a concentratorului și posibil a condiției de rezonanță. Se determină uzura liniară care permite funcționarea optimă a lanțului ultrasonic.

CUVINTE CHEIE: electroeroziune, lanț ultrasonic, concentrator, uzura

1 INTRODUCERE

Asistarea cu ultrasunete (US) a finisării prin electroeroziune (Electrical Discharge Machining - EDM) permite creșterea performanțelor tehnologice comparativ cu prelucrarea clasică (fără ultrasunete) în ceea ce privește productivitatea, uzura volumetrică relativă și rugozitatea suprafeței prelucrate (Shabgard s.a., 2009), (Hung, 2006), (Suzuki, 2012) etc.

Realizarea acestui procedeu de prelucrare combinat (EDM+US) presupune utilizarea unui lanț ultrasonic care cuprinde un transductor și un concentrator de energie care include scula sau piesa prelucrată. Acestea din urmă vibrează cu o frecvență ultrasonică, în mod uzual 20000 sau 40000 Hz în timpul desfășurării procesului de electroeroziune.

Oscilațiile ultrasonice au direcția perpendiculară pe suprafața prelucrată producând în interstițiul de prelucrare cavitate ultrasonică. Aceasta are efecte spectaculoase asupra performanțelor tehnologice la finisarea EDM și micro-EDM care se desfășoară în condiții dificile de prelucrare datorită interstițiului de prelucrare foarte redus, de ordinul micrometrilor (Ghiculescu, 2013).

Lanțul ultrasonic trebuie să funcționeze în condiții de rezonanță, egalitate dintre frecvența proprie a transductorului și concentratorului.

¹ Specializarea Tehnologia Construcțiilor de Mașini, Facultatea IMST;

E-mail: madalina1091@yahoo.com;

2 STADIUL ACTUAL

Structura unui lanț ultrasonic este prezentată în figura 1, unde: 1- este buca reflectantă; 2- transductor piezoceramic (titanat zirconat de plumb-PZT); 3- bucușă radiantă; 4- concentrator în trepte 5- flansa nodală; 6- electrodul sculei.

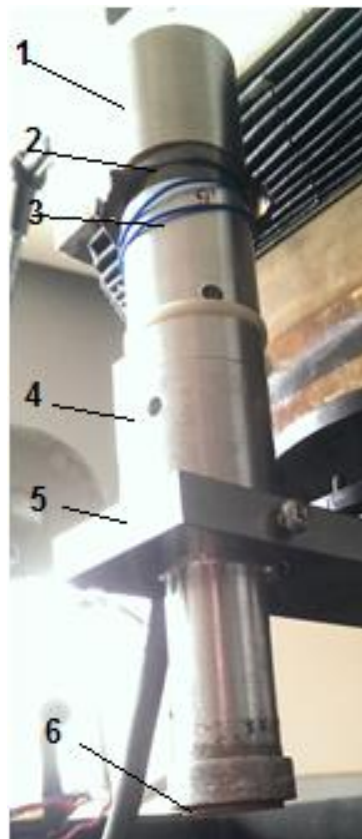


Fig. 1. Structura lanțului ultrasonic utilizat la EDM+US

În lanțul ultraacustic, se formează unde staționare care rezultă din suprapoziția unor unde elementare de aceeași frecvență care se deplasează în sensuri opuse.

Se formează puncte cu amplitudine constantă: **Ventru (antinod) (V)** care oscilează cu amplitudine maximă;

Nod (N) care au amplitudine minimă (zero) – fig 2.

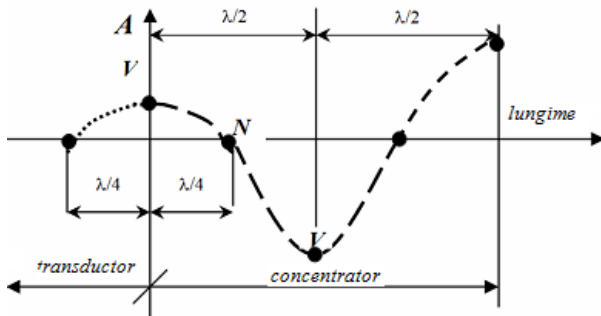


Fig. 2. Unde staționare, noduri și antinoduri în lanțul ultrasonic

Concentratoarele au rolul de a amplifica oscilațiile provenite de la transductorul PZT. Prin urmare, suprafața sa frontală oscilează cu amplitudine maximă, constituind un antinod (ventru). În cazul de față, electrodul-sculă, fiind situat în capătul lanțului este parte integrantă din concentrator, iar suprafața sa frontală oscilează cu amplitudine maximă.

Pentru funcționarea corectă a lanțului ultrasonic trebuie să se obțină condiția de rezonanță respectiv egalitatea dintre frecvența proprie a transductorului (20,08 kHz), care reprezintă frecvența țintă furnizată de producătorul de transductoare ultrasonice, Institutul de Mecanica Solidului al Academiei Romane, IMSAR cu frecvența proprie a concentratorului care integrează și electrodul sculă.

Condiția de rezonanță presupune ajustarea iterativă a dimensiunilor concentratorului astfel încât să se obțină condiția menționată mai sus. Aceasta presupune un consum mare de timp în etapa de pregătire a fabricației care creează un dezavantaj major al tehnologiei EDM + US – flexibilitatea redusă. Aceasta înseamnă pentru fiecare schimbare a unui reper prelucrat un consum de resurse ridicat care se justifică la un volum mai mare de fabricație. Acest dezavantaj este însă compensat prin creșterea performanțelor tehnologice la EDM respectiv productivitate, uzura volumetrică relativă și rugozitatea suprafeței prelucrate[1-6].

Lipsa de flexibilitate la EDM + US poate fi ameliorată prin ingineria asistată de calculator, care presupune modelarea cu elemente finite a

concentratoarelor de formă complexă obținându-se astfel mai rapid condiția de rezonanță.

Realizarea unor noi profile ale concentratoarelor ultrasonice pentru diverse aplicații [7]. Având în vedere caracterul unic al formei concentratorului în relația cu tipul de prelucrare[8] reprezintă o importantă direcție actuală de cercetare bazată pe modelarea cu elemente finite.

3 MODELAREA CU ELEMENTE FINITE A FUNCȚIONĂRII CONCENTRATORULUI ULTRASONIC

Aplicarea metodei elementelor finite se concentrează pe modelarea și simularea funcționării concentratorului în trepte în conexiune cu transductorul PZT și se realizează în Comsol Multiphysics 4.2, accesând succesiv, Structural Mechanics, Solid Mechanics, Eigenfrequency.

Scopul modelării cu MEF este de a reduce timpul de pregătire a fabricației la prelucrările cu ultrasunete și de a verifica modul de funcționare a lanțului ultrasonic la frecvența de rezonanță.

3.1 Stabilirea parametrilor

S-a apelat la o modelare parametrizată care permite modificările rapide ulterioare a modelului creat pentru rularea eficientă a programului. Sunt definiți următorii parametri de modelare în Global Definitions, prezentați în figura 3.

Name	Expression	Value	Description
rs	12.5[mm]	0.0125 m	raza sculei
hs	2.2[mm]	0.0022 m	inaltime scula
r1	16[mm]	0.016 m	raza treapta 1
h1	9.8[mm]	0.0098 m	inaltime treapta 1
r2	13.65[mm]	0.01365 m	raza treapta 2
h2	40.7[mm]	0.0407 m	inaltime treapta 2
r3	19.65[mm]	0.01965 m	raza treapta 3
h3	59.8[mm]	0.0598 m	inaltime treapta 3
rgaura	6.6[mm]	0.0066 m	raza gaurii
hgaura	25[mm]	0.025 m	inaltime gaura filetata
hprezon	25[mm]	0.025 m	lungime prezon
zcanal	60.24[mm]	0.06024 m	cota canal
rcanal	2[mm]	0.002 m	raza canal
rg2	3[mm]	0.003 m	raza gaura filet pastila c...
hg2	15[mm]	0.015 m	inaltime gaura filet pastila
hf	12[mm]	0.012 m	inaltime filet

Fig.3. Parametrii concentratorului

3.2 Crearea geometriei

În această etapă a fost creată geometria concentratorului reprezentată în figura 4, într-un spațiu dimensional 2D axis – symmetric.

Forma prezentată în figura de mai jos este compusă din figuri geometrice simple

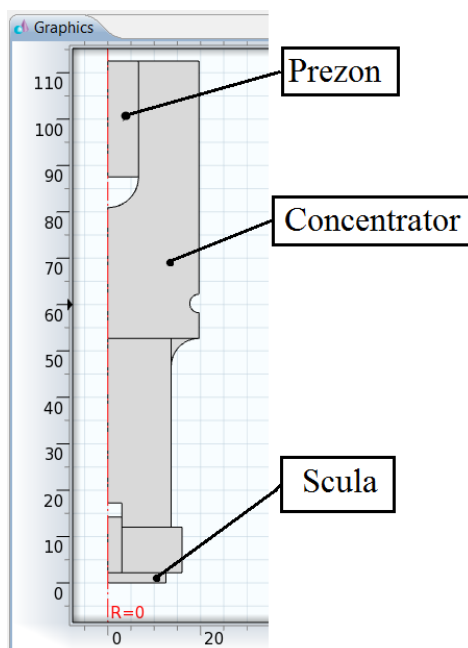


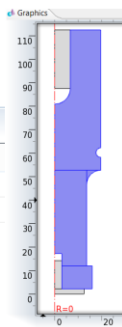
Fig.4. Geometria concentratorului

3.3 Stabilirea caracteristicilor de material

Au fost introduse caracteristicile de material corespunzătoare părților componente ale concentratorului: corpul este realizat din aliaj duraluminiu, electrodul sculă din cupru de puritate ridicată 99,5%, prezonul de prindere a concentratorului de restul lanțului ultrasonic din oțel AISI 43-40 din bibliotecă de materiale a Comsol Multiphysics. Acestea au fost completate și cu date experimentale referitoare la proprietățile de material care afectează frecvența proprie a concentratorului.

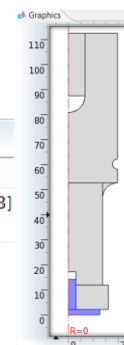
Duraluminiu

Property	Name	Value
✓ Density	rho	rho_solid_1(T[1/K])[kg/m^3]
✓ Young's modulus	E	E(T[1/K])[Pa]
✓ Poisson's ratio	nu	nu(T[1/K])



Cupru

Property	Name	Value
✓ Density	rho	8930[kg/m^3]
✓ Young's modulus	E	1.532e11[Pa]
✓ Poisson's ratio	nu	0.35



Oțel

Property	Name	Value
✓ Density	rho	7850[kg/m^3]
✓ Young's modulus	E	205e9[Pa]
✓ Poisson's ratio	nu	0.28

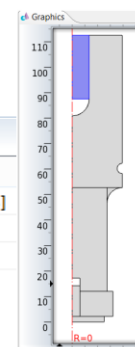


Fig.5. Caracteristicile materialelor

3.4 Condițiile la limită pentru determinarea frecvenței proprii a concentratorului.

Pentru determinarea frecvenței proprii a concentratorului, se introduc condițiile la limită în Physics sub forma *free* (fără constrângeri mecanice) după cum este prezentat în figura 6.

Această condiție la limită reproduce prinderea concentratorului în vederea determinării frecvenței proprii reale în laborator.

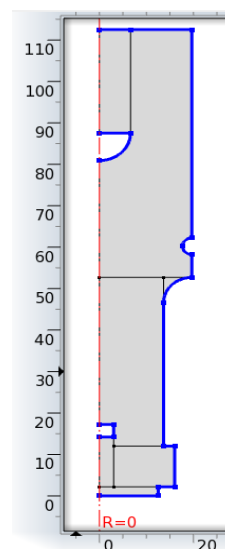


Fig. 6. Condițiile la limită pentru determinarea frecvenței proprii a concentratorului

3.5 Discretizarea cu elemente triunghiulare si calitatea acesteia

Discretizarea se realizează cu elemente tringhiulare și este prezentată împreună cu calitatea corespunzătoare obținută - prin accesarea funcției Statistics din meniul Mesh - în figura 7.

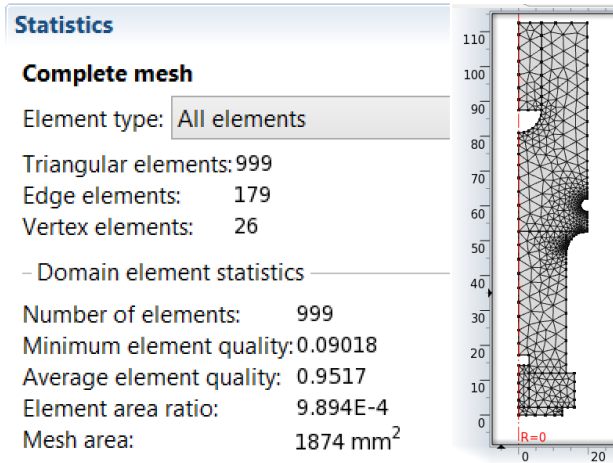


Fig. 7 . Discretizarea cu elemente triunghiulare si calitatea acesteia

3.6 Determinarea frecvenței proprii

Se accesează funcția Study din Model Builder pentru care s-a stabilit frecvența proprie de 20000 Hz în jurul căreia se realizează căutarea, după cum este prezentat în figura 8.

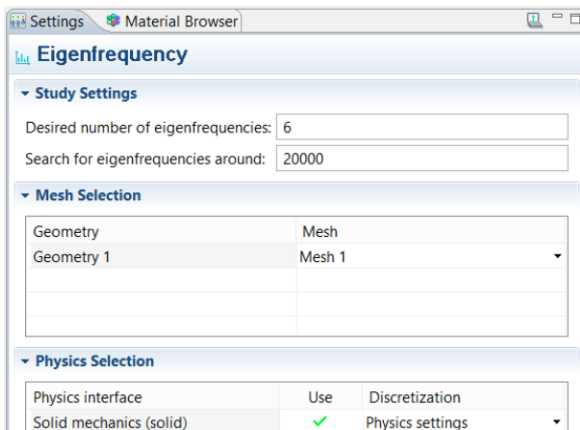


Fig.8. Apelarea funcției Study si stabilirea parametrilor

4 REZULTATE OBȚINUTE LA MODELAREA LANȚULUI ULTRASONIC

Cele mai importante rezultate obținute la modelarea unui lanț ultrasonic si geometria parametrilor construcției concentratorului sunt prezentate in etapele de mai jos.

În figura 9 se prezintă frecvența proprie obținută (19424 Hz) și deformațiile relative ale concentratorului in prima etapă a modelării.

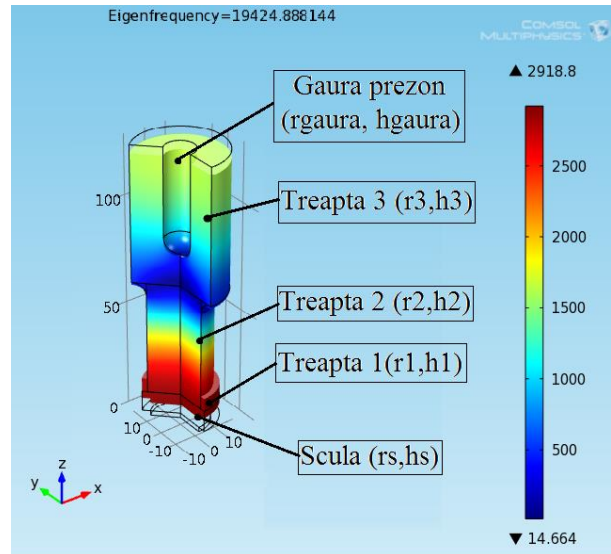


Fig.9. Frecventa si deformatiile relative in prima etapa

În următoarea etapă a fost inserat un prezon ce are rolul de a face legatura între concentrator și restul ansamblului lanțului ultrasonic si parametri necesari modelării fiind prezentați în figura 10.

Parameters			
Name	Expression	Value	Description
r3	19.65[mm]	0.01965 m	raza treapta 3
hprezon	25[mm]	0.025 m	lungime prezon

Fig.10. Parametrii de modelare aferenti prezonului

Rezultatele modelării arata o crestere a frecvenței proprii (20163,56 Hz) și o ușoară crestere a amplificării prezentate in figura 11.

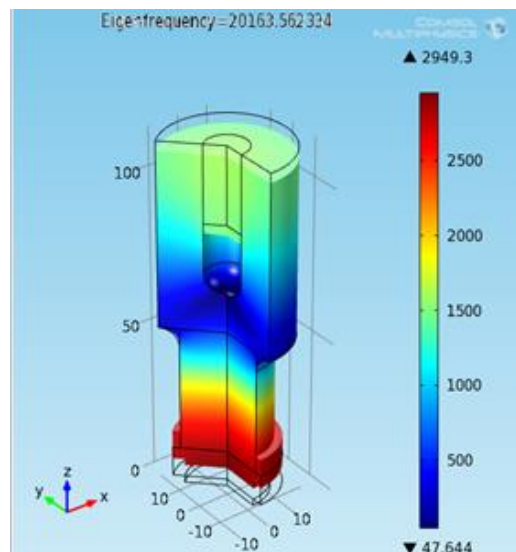


Fig.11. Frecvența de rezonanță dupa inserarea prezonului

Următorul pas este dedicat inserării canalului nodal necesar prinderii lanțului ultrasonic. Punctul nodal reprezintă zona din lanțul ultrasonic a cărei amplitudine este minimă (ideal 0). În acest caz el este situat la cota 59,40 mm (figura 12).

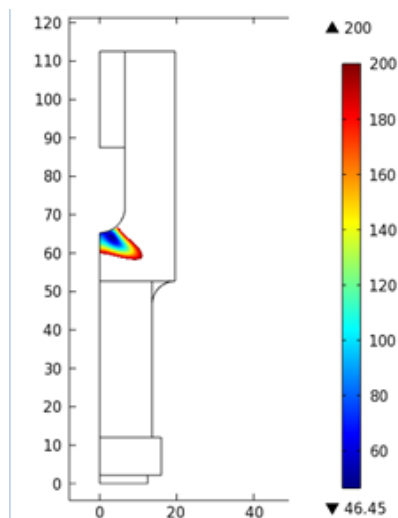


Fig.12. Determinarea punctului nodal

Parametrii necesari modelării canalului nodal sunt prezentați în figura 13.

Name	Expression	Value	Description
zcanal	69.3[mm]	0.0693 m	cota canal
rcanal	2[mm]	0.002 m	raza canal

Fig.13. Parametrii canalului nodal

În figura 14 sunt prezentate rezultatele obținute la introducerea canalului nodal, respectiv frecvența proprie care a scăzut la valoarea 20062.01 Hz, iar amplificarea a crescut la valoarea 3250.1.

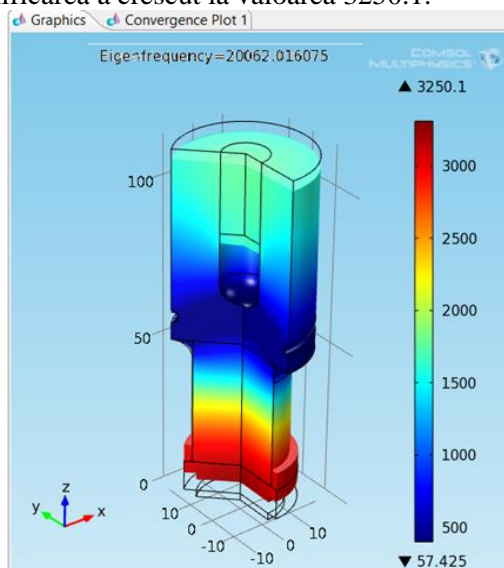


Fig.14. Frecvența de rezonanță și deformări relative la realizarea canalului nodal

În etapa următoare a fost introdusă scula cu asamblare filetata, parametrii necesari modelării fiind prezentați în figura 15.

Name	Expression	Value	Description
rg2	3[mm]	0.003 m	raza gaura filet pastila c...
hg2	15[mm]	0.015 m	inaltime gaura filet pastila
hf	12[mm]	0.012 m	inaltime filet

Fig.15. Parametrii alezajului pentru fixarea electrodului de cupru.

Rezultatele obținute în această etapă sunt prezentate în figura 16. Se observă că frecvența proprie a crescut la 20072.49 Hz, iar amplificarea a scăzut la 3109.2.

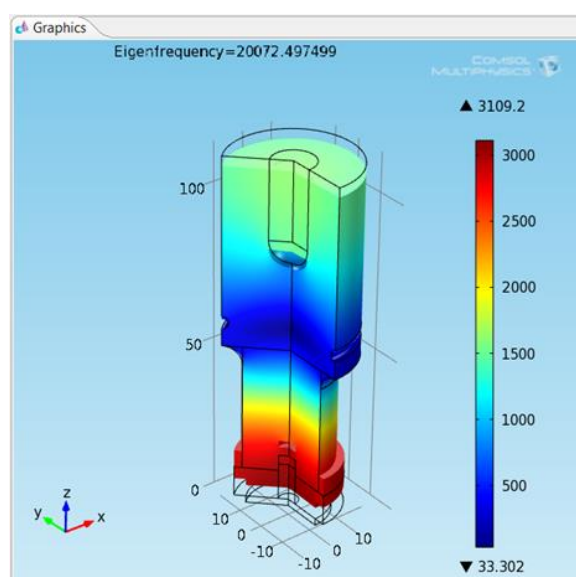


Fig.16. Frecvența de rezonanță după realizarea alezajului.

În vederea scurtării timpului de fabricare a lanțului ultrasonic se realizează un grafic cu date obținute prin modelare în Comsol care evidențiază dependența frecvenței de rezonanță de lungimea concentratorului. Cu ajutorul ecuației obținute din grafic se poate calcula lungimea pentru atingerea frecvenței de rezonanță dorite, respectiv 112.5 mm (Figura.17.) Diferența de lungime a fost repartizată în mod egal între parametrii h2 și h3.

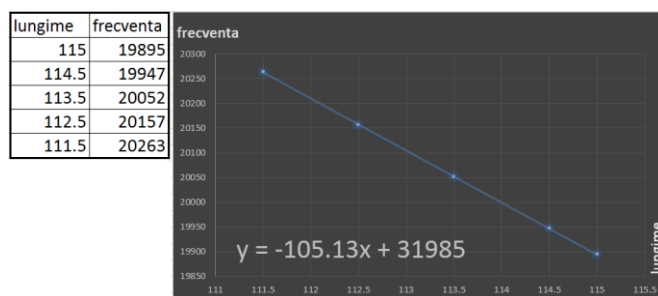


Fig.17. Dependența frecvenței de lungimea sculei

In figura 18 a fost reprezentată dependența dintre lungimea electrodului sculă și frecvența proprie a concentratorului care integrează și electrodul sculă. Această dependență este utilă pentru a preveni situația în care datorită uzurii accentuate a electrodului sculă se obține o frecvență proprie a lanțului ultrasonic care se situează în afara domeniului de frecvențe urmărit de generatorul de ultrasunete. În regim automat, generatorul utilizat poate să urmărească frecvența proprie a lanțului ultrasonic într-o marjă de cca. 600 Hz. Se observă că la o uzură a electrodului sculă de 0,4 mm, rezultă o creștere a frecvenței proprii de 211 Hz care se încadrează în marja de funcționare în condiții de rezonanță a generatorului ultrasonic.

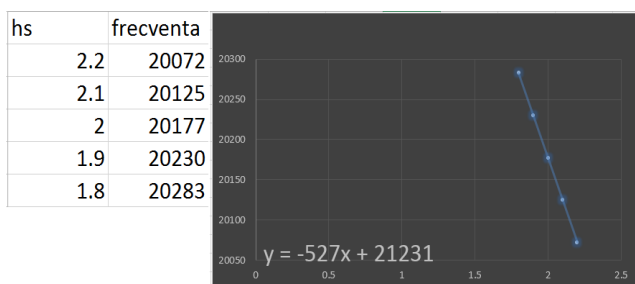


Fig.18. Dependența frecvenței de lungimea electrodului sculă

In figura 19 a fost reprezentată dependența dintre variația înălțimii electrodului sculă și poziția (cota) canalului nodal. Se observă că la uzură de 0,4 mm poziția ideală a canalului nodal s-a modificat cu 0,42 mm. Aceasta se traduce printr-o modificare a deplasărilor relative de cca. 0.3% nesemnificativ în raport cu amplificarea totală dată de concentrator.

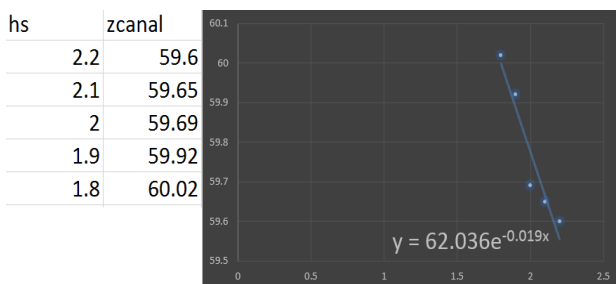


Fig.19. Dependența poziției punctului nodal de lungimea electrodului sculă

5 REZULTATE EXPERIMENTALE

Pe baza rezultatelor obținute prin modelarea cu elemente finite s-a procedat la dimensionarea concentratorului ultrasonic. S-a măsurat frecvența proprie a acestui cu instalația din figura 20.

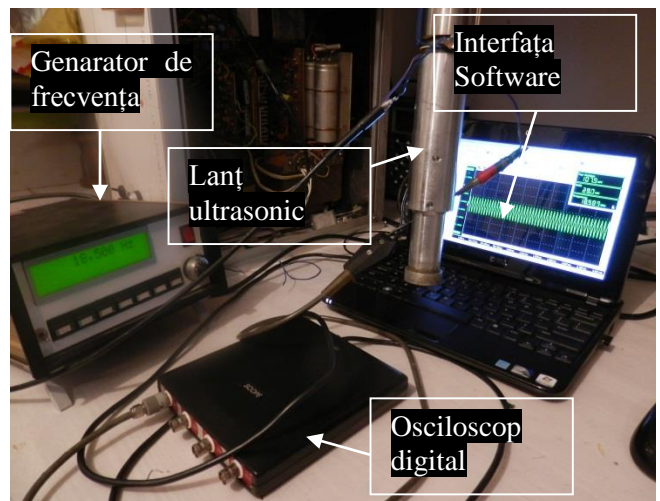


Fig.20. Determinarea frecvenței proprii a lanțului ultrasonic.

In figura 21 se prezintă parametrii de funcționare tensiune și curent ai generatorului ultrasonic pe standul de testare. În urma ajustărilor lungimii concentratorului realizate experimental, s-a obținut condiția de rezonanță – egalitatea dintre frecvența proprie a transductorului și a concentratorului care integrează electrodul – sculă, ambele situându-se în domeniul de frecvențe furnizate de generatorul de ultrasunete.

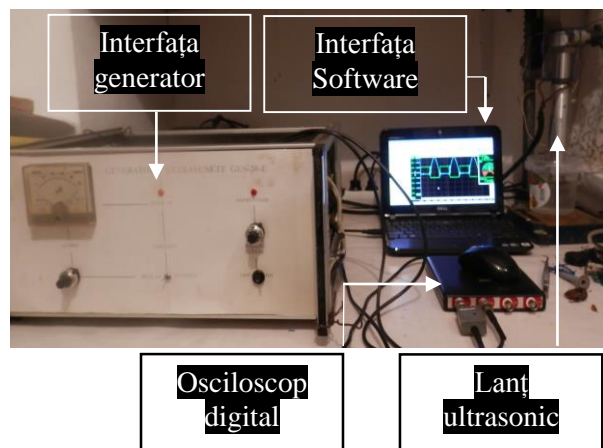


Fig.21. Monitorizarea tensiunii și curentului furnizate de generatorul ultrasonic.

In figura 22 se prezintă schematic uzura electrodului sculă pe suprafața frontală activă. Se observă că suprafața corespunzătoare găurii de spălare din piesă, prezintă o proeminență $\Delta h < 0.01$ mm care reprezintă valoarea uzurii liniare a electrodului.

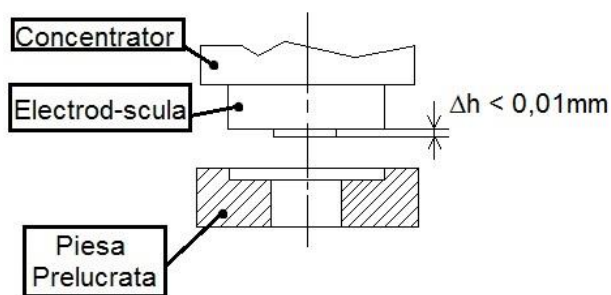


Fig.22 Reprezentarea schematica a uzurii sculei pe suprafața frontală

În figura 23, este prezentat modul în care a fost măsurată uzura liniară a electrodului sculă, utilizând un comparator cu ajutorul căruia a fost palpată suprafața frontală, respectiv suprafața activă a electrodului sculă, suportul magnetic al comparatorului a fost fixat pe masa mașinii. Deplasările s-au efectuat în planul xoy sesizându-se abaterile la paralelism ale suprafeței frontale în raport cu masa mașinii, în prealabil realizându-se reglajul pe valoarea "0" în două puncte situate diametral opus pe două direcții perpendiculare ale suprafeței frontale a sculei.

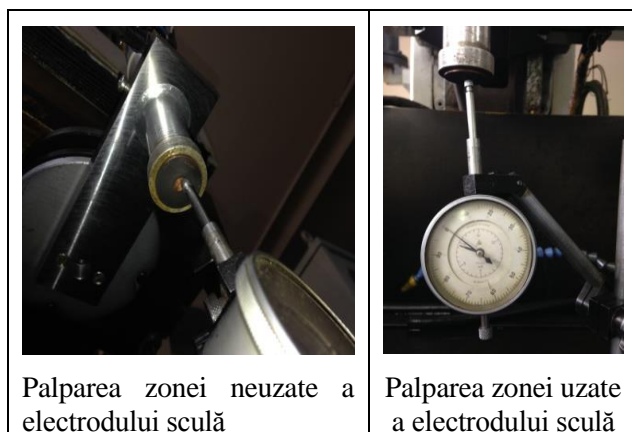


Fig. 23 Măsurarea uzurii liniare a electrodului sculă

6 CONCLUZII

În urma modelării cu metoda elementelor finite a concentratorului care integrează electrodul sculă s-au găsit soluții privind obținerea condiției de rezonanță prin modificările constructive ale concentratorului. Reducerea lungimii concentratorului, introducerea razei de racordare între cele două trepte, a găurilor filetate pentru asamblare au condus la creșterea frecvenței proprii. Introducerea canalului nodal pentru prinderea lanțului ultrasonic a determinat scăderea frecvenței de rezonanță. Aceste soluții au fost puse în practică astfel încât s-a obținut egalitatea frecvenței proprii a concentratorului și a transductorului ultrasonic.

În urma experimentărilor s-a observat o uzură liniară a electrodului sculă, mai mică de 0.01 mm. Rezultatele modelării au arătat că o valoare a uzurii de 0.4 mm conduce la o modificare a frecvenței proprii cu 200 Hz. Generatorul ultrasonic cu control adaptiv are capacitatea să urmărească frecvența proprie a lanțului ultrasonic într-o marjă de cca. 600 Hz, prin urmare prelucrările s-au desfășurat în condiții de rezonanță, frecvență proprie a lanțului ultrasonic nefiind afectată de uzura liniară a sculei.

7 BIBLIOGRAFIE

- [1]. C. Gao, A. Liu, Study of ultrasonically aided of micro-electrical-discharge-machining by the application of workpiece vibration, *J. of Mat. Process. Technology* Vol. 139, pp.226–228, (2003).
- [2]. M. R. Shabgard, B. Sadizadeh, H. Kakoulvand, The Effect of Ultrasonic Vibration of Workpiece in Electrical Discharge Machining of AISI13 Tool Steel, *World Academy of Science, Engineering and Technology*, Vol 3. pp. 332-336, (2009).
- [3]. J.-C. Hung, et al., Using a helical micro-tool in micro-EDM combined with ultrasonic vibration for micro-hole machining, *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 16, pp. 2705-2713, (2006).
- [4]. H. Huang, et al., Ultrasonic vibration assisted electro-discharge machining of microholes in Nitinol, *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 13 pp.693-700, (2003).
- [5]. Kiyoshi Suzuki, Takuya Takada, Zhi Rong Zhou, Takuya Okamichi, Manabu Iwai, Shinichi Ninomiya, Effects of Ultrasonic Vibrations Given to an Electrode on the EDM Performance in Processing PCD, *Advanced Materials Research*, Vol. 565, pp. 394-399, (2012).
- [6]. B.H. Yan, et al., Study of precision micro-holes in borosilicate glass using micro EDM combined with micro ultrasonic vibration machining, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 42, pp. 1105–1112, (2002).
- [7]. I. Dudás, A. Kyusojin, Gy. Varga, H. Isobe, Cs Oravecz, Experimental Examination of Propagation of Longitudinal Deformation of Different Shapes of Horn Used at Ultrasonic Machining, 11th *Int.Conf. on Tools*, Univ. of Miskolc, pp. 317-324, 09-11, (2004).
- [8]. M. Nad, Ultrasonic horn design for ultrasonic machining technologies, *Applied and Computational Mechanics*, Vol 4., pp. 79–88, (2010)