



**Bogdan-Ionuț CRISTEA**

**Rezumat Teză de Doctorat**

**CERCETĂRI PRIVIND CREȘTEREA  
PERFORMANȚELOR SISTEMELOR DE  
AVANS PENTRU MICROELECTROEROZIUNE  
ASISTATĂ DE ULTRASUNETE**

**Comisia de doctorat**

Președinte	<b>Prof. dr. ing.</b> Nicolae IONESCU	Universitatea Națională de Știință și Tehnologie POLITEHNICA București
Conducător de doctorat	<b>Prof. dr. ing.</b> Liviu Daniel GHICULESCU	
Referent	<b>Prof. dr. ing.</b> Oana DODUN-DES-PERRIERES	Universitatea Tehnică “Gheorghe Asachi” Iași
Referent	<b>Prof. dr. ing.</b> Aurel Mihail ȚIȚU	Universitatea “Lucian Blaga” Sibiu
Referent	<b>C.S.1 dr. ing.</b> Mihai MĂRGĂRITESCU	Institutul Național de Cercetare Dezvoltare pentru Mecatronică și Tehnica Măsurării București

**Cuvinte cheie:** sistem de avans, concentrator ultrasonic, microelectroeroziune asistată de ultrasunete

<b>Cuprins</b>	<b>Pagină rezumat</b>	<b>Pagină teză</b>
<b><i>Capitolul 1. Stadiul actual al dezvoltării electroeroziunii</i></b>	<b>4</b>	<b>13</b>
1.1. Etapele mecanismului de prelevare a materialului	4	13
1.2. Durata de viață a bulei de gaz și fenomene conexe	5	15
1.3. Performanțele electroeroziunii	5	25
<b><i>Capitolul 2. Stadiul actual al dezvoltării microelectroeroziunii și asistării cu ultrasunete</i></b>	<b>6</b>	<b>31</b>
2.1. Diferențele dintre electroeroziune și microelectroeroziune	6	31
2.2. Performanțele microelectroeroziunii	7	32
2.3. Limitări ale microelectroeroziunii	8	36
2.4. Asistarea cu ultrasunete a microelectroeroziunii	8	39
2.5. Fenomene de bază la asistarea cu ultrasunete a procesului de electroeroziune	9	42
2.6. Performanțele microelectroeroziunii asistate de ultrasunete	11	48
<b><i>Capitolul 3. Stadiul actual al dezvoltării sistemelor de avans pentru electroeroziune</i></b>	<b>12</b>	<b>53</b>
3.1. Sistemul de control servo	12	56
3.2. Poziționarea și precizia sistemelor de avans	12	58
3.3. Sisteme de control de bază	13	61
<b><i>Capitolul 4. Concluzii privind stadiul actual al dezvoltării microelectroeroziunii asistate de ultrasunete și a sistemelor de avans</i></b>	<b>15</b>	<b>77</b>
<b><i>Capitolul 5. Obiectivele, direcțiile de cercetare și metodologia abordate în teza de doctorat</i></b>	<b>16</b>	<b>81</b>
5.1. Sinteza aspectelor critice privind stadiul actual al dezvoltării microelectroeroziunii asistate de ultrasunete și a sistemelor de avans	16	81
5.2. Direcții de cercetare și metodologia de cercetare ale tezei de doctorat	17	82
5.3. Obiective ale tezei de doctorat	17	83
5.4. Metodologia de cercetare	18	83
<b><i>Capitolul 6. Proiectarea conceptuală a sistemului de avans pentru microelectroeroziune asistată de ultrasunete</i></b>	<b>19</b>	<b>85</b>
6.1. Formularea funcțiilor sistemului de avans	19	86
6.2. Identificarea soluțiilor	20	93
6.3. Selectarea variantelor de soluții	21	96
6.3.1. Mecanismul tip șurub-piuliță	21	96
6.3.2. Cuplajul	21	97
6.3.3. Motorul de acționare	21	97
6.4. Aplicarea detaliată a metodei Desfășurării funcției calității	22	103
6.5. Aplicarea detaliată a metodei Analiza modurilor de defectare și a efectelor acestora	23	112
6.5.1. Calcularea Numărului de Eficiență Economică	26	121
<b><i>Capitolul 7. Proiectarea detaliată a sistemului de avans pentru microelectroeroziune asistată de ultrasunete</i></b>	<b>27</b>	<b>123</b>
7.1. Mecanismul șurub-piuliță	27	123
7.1.1. Dimensionarea zonelor-cheie	27	129
7.2. Proiectarea șurubului conducător	30	131
7.3. Proiectarea rolei și piuliței	31	133
7.4. Proiectarea elementelor conexe	33	136

<b>Cuprins</b>	<b>Pagină rezumat</b>	<b>Pagină teză</b>
7.5. Proiectarea sistemului de prindere a lanțului ultrasonic	35	139
<b>Capitolul 8. Modelarea și simularea funcționării sistemului de avans pentru microelectroeroziune asistată de ultrasunete</b>	<b>37</b>	<b>142</b>
8.1. Modelarea și simularea funcționării concentratorului ultrasonic	37	142
8.1.1. Ajustarea concentratorului pentru atingerea frecvenței țintă	38	151
8.2. Simularea numerică privind frecvența proprie a sistemului de avans	40	155
8.2.1. Determinarea frecvențelor utilizate pentru comanda motorului pas cu pas	40	155
8.2.2. Simularea privind frecvența proprie	42	157
8.2.3. Rezultate	42	160
8.3. Modelarea și simularea deformației șurubului conducător	44	163
8.3.1. Determinarea suprafețelor de contact	44	163
8.3.2. Simularea deformării	45	168
8.3.3. Rezultate	46	170
<b>Capitolul 9. Proiectarea procesului tehnologic, realizarea și testarea sistemului de avans</b>	<b>49</b>	<b>175</b>
9.1. Testarea concentratorului ultrasonic	49	175
9.2. Testarea deplasării sistemului de avans	50	194
9.2.1. Testarea modului de execuție a pașilor	53	197
9.2.2. Testarea timpului de răspuns	54	198
9.2.3. Testarea deplasării pe curba "S"	55	200
<b>Capitolul 10. Concluzii finale, contribuții originale și direcții de cercetare</b>	<b>56</b>	<b>204</b>
<b>Bibliografie selectivă</b>	<b>60</b>	<b>211</b>
<b>Anexa 1 – Lucrări publicate</b>	<b>63</b>	<b>224</b>

## Capitolul 1. Stadiul actual al dezvoltării electroeroziunii

**Prelucrarea prin electroeroziune (Electric Discharge Machining - EDM)**, cea mai utilizată tehnologie neconvențională, face parte din categoria prelucrărilor **erozive termice** deoarece utilizează energia termică pentru topirea, vaporizarea și chiar fierberea materialului piesei prelucrate [1].

### 1.1. Etapele mecanismului de prelevare a materialului

Există multe modele care explică fenomenologia EDM, încă insuficient elucidată deoarece procesul se desfășoară din punct de vedere geometric la scară micrometrică sau chiar nanometrică, iar din punct de vedere temporal la scară de microsecunde sau mai puțin.

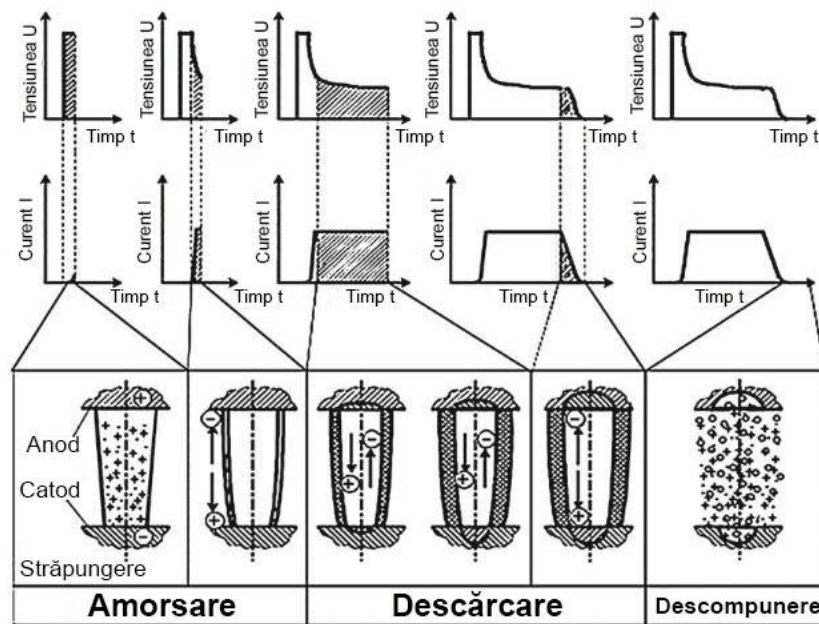


Figura 1.1 Principiul procesului EDM [2]

În **Figura 1.1**, sunt prezentate etapele de formare a canalului de plasmă al descărcării și de prelevare a materialului în corespondență cu variația tensiunii și curentului de descărcare.

În cadrul procesului EDM, există mai multe tipuri de descărcări, în funcție de evoluția în timp a tensiunii de descărcare ( $U_e$ ) și a curentului de descărcare ( $I_e$ ), prezentate în **Figura 1.2**.

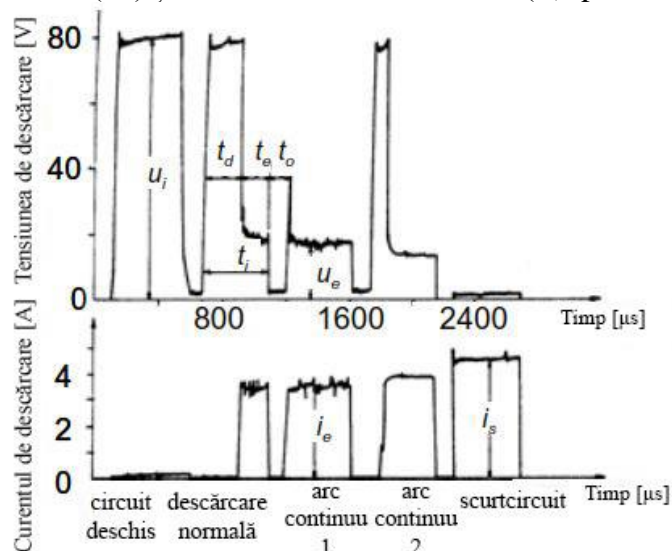
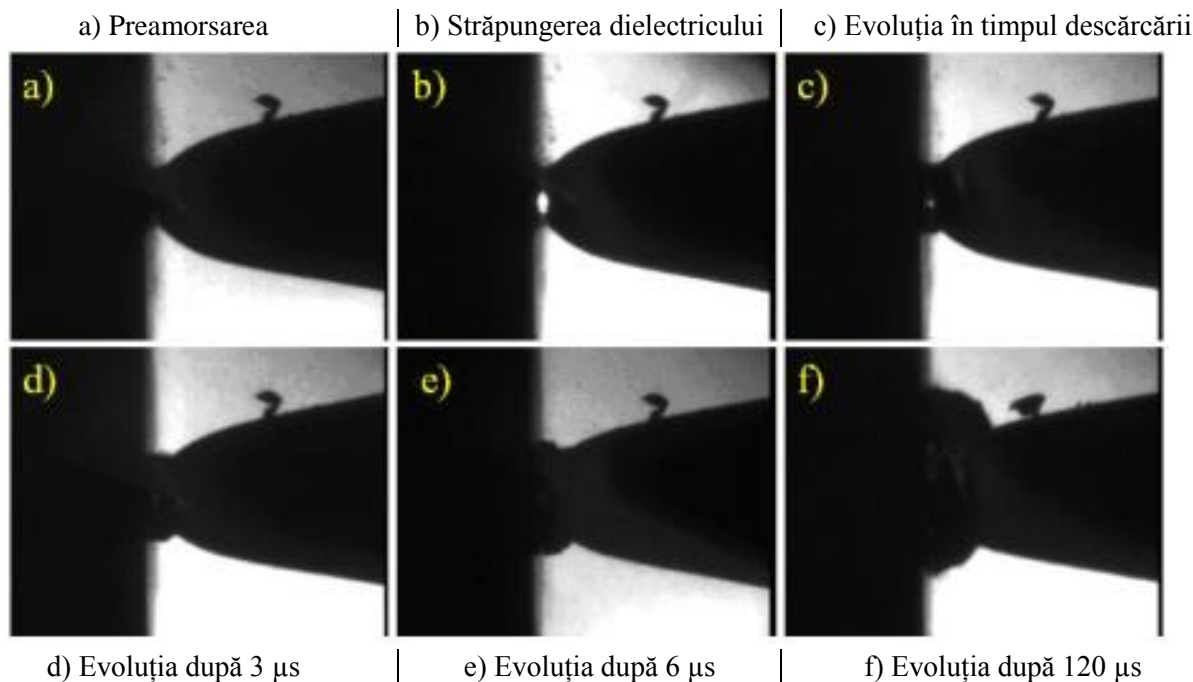


Figura 1.2 Diferite descărcări EDM [6]

## 1.2. Durata de viață a bulei de gaz și fenomene conexe

Canalul de plasmă este format în timpul descărcării între suprafețele sculei și piesei de prelucrat, a cărui temperatură are aproximativ 10000 °C. Astfel se formează o bulă de gaz în jurul canalului de plasmă.

În **Figura 1.3**, este prezentată evoluția bulei de gaz, unde se observă că mărimea acesteia este mult mai mare decât canalul de plasmă și spotul EDM.



**Figura 1.3** Evoluția bulei de gaz la EDM cu următorii parametrii:  $I_{max} = 25 \text{ A}$ ,  $t_i = 6 \mu\text{s}$ ,  $s_F = 15 \mu\text{m}$ , lichid dielectric pe bază de hidrocarburi [4]

În procesul de electroeroziune clasică, bulea de gaz poate persista mult timp după încheierea descărcării electrice. Ca rezultat, materialul topit de descărcare se solidifică înainte ca forțele hidraulice să-l poată îndepărta, ceea ce reduce eficiența procesului [3].

## 1.3. Performanțele electroeroziunii

**Tabelul 1.1** prezintă o comparație între procedeele convenționale și cele neconvenționale [1].

**Tabelul 1.1** Comparație între performanțele procedeelelor convenționale și neconvenționale [1]

Procedee de prelucrare	Productivitate maximă	Productivitate specifică	Precizie maximă	Rugozitate minimă (Ra)	Consum de scule
	[mm <sup>3</sup> /min]	[mm <sup>3</sup> /(min/kW)]	[mm]	[μm]	-
<b>Așchiere</b>					
Degroșare	10 <sup>5</sup>	10 <sup>4</sup>	0.01	6.3	Da
Finisare	10 <sup>3</sup>	10 <sup>3</sup>	0.001	0.08	Da
Superfinisare	1	10 <sup>2</sup>	0.00001	0.0001	Da
<b>Neconvenționale</b>					
<i>Electroeroziune</i>	<i>10<sup>3</sup></i>	<i>10</i>	<i>0.0001</i>	<i>0.05</i>	<i>Da</i>
Plasmă termică	10 <sup>5</sup>	10 <sup>3</sup>	0.5	25	Da
Laser	10	10	0.01	1.6	Nu
Fascicul de electroni	10 <sup>2</sup>	10	0.01	1.6	Nu
Ultrasunete	10 <sup>2</sup>	10 <sup>2</sup>	0.005	0.1	Da

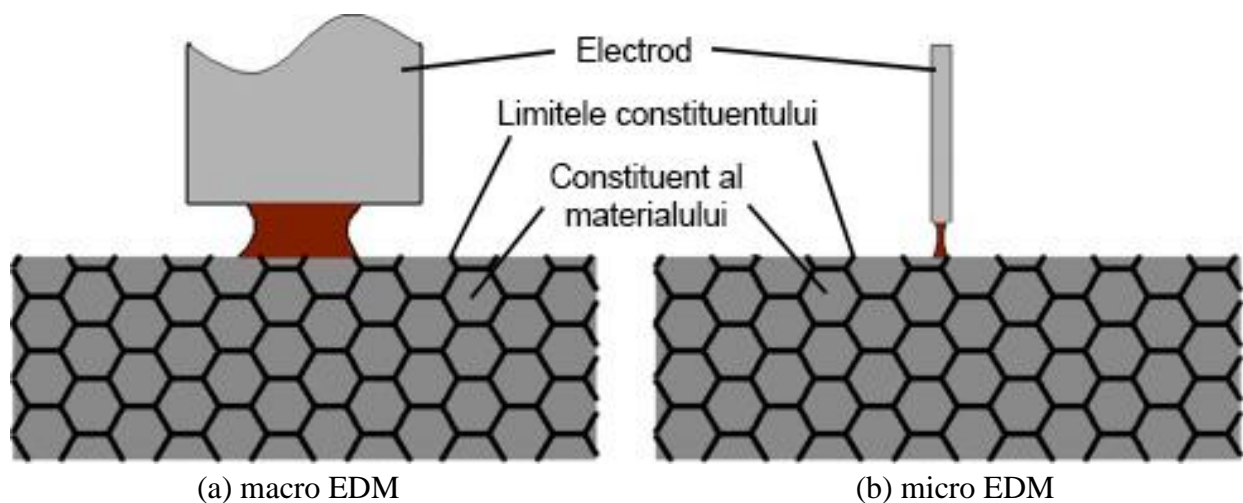
## Capitolul 2. Stadiul actual al dezvoltării microelectroeroziunii și asistării cu ultrasunete

Microelectroeroziunea (microEDM) este o variantă de proces EDM, ce operează la scară micrometrică ( $1 \div 999 \mu\text{m}$ ), caracterizată prin: nivel energetic foarte redus al descărcării și interstițiu de lucru foarte mic, cu consecințe negative privind instabilitatea procesului [2].

### 2.1. Diferențele dintre electroeroziune și microelectroeroziune

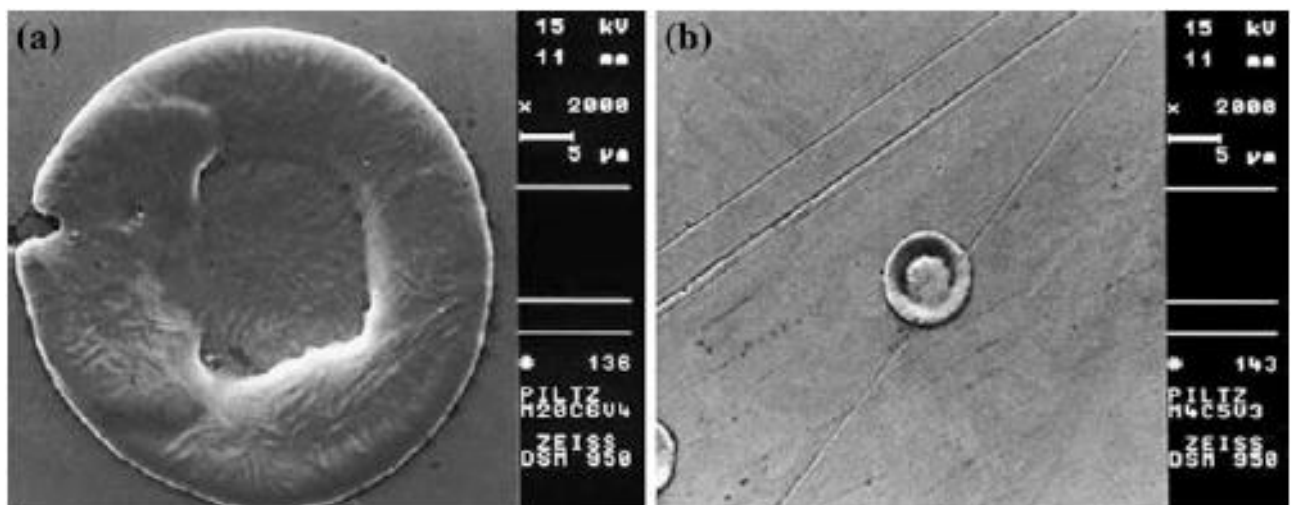
Procesul de microEDM este similar cu EDM, totuși există câteva diferențe, și anume:

a) Cea mai importantă diferență este dimensiunea canalului de plasmă. La EDM, canalul de plasmă este mult mai mic decât electrodul-sculă. La microEDM canalul de plasmă este comparabil, ca dimensiune, cu electrodul-sculă [8] (**Figura 2.1**);



**Figura 2.1** Diferența între canalul de plasmă la macro EDM (a) și la micro EDM (b) [10]

b) Electrozii de dimensiuni mici ( $< \varnothing 30 \mu\text{m}$ ) utilizați în procesul microEDM nu pot disipa căldura emisă de descărcare, datorită volumului mic. De asemenea au și o masă mică, iar la energii mari de descărcare aceștia se pot rupe. Astfel se impune o limită maximă a energiei de descărcare. Diferența dintre energiile de descărcare este vizibilă în **Figura 2.2** indirect, prin dimensiunile craterelor [8].



**Figura 2.2** Comparare între dimensiunile craterelor la (a) EDM (stânga)  $20 \mu\text{m}$  și la (b) microEDM (dreapta)  $5 \mu\text{m}$  [8]



c) Presiunea de spălare, ce acționează asupra electrodului-sculă este mai mare la microEDM decât la EDM, deoarece lichidul dielectric trebuie să pătrundă într-un interstițiu de prelucrare mult mai îngust;

d) La fiecare descărcare, uzura electrodului-sculă este mult mai mare la microEDM;

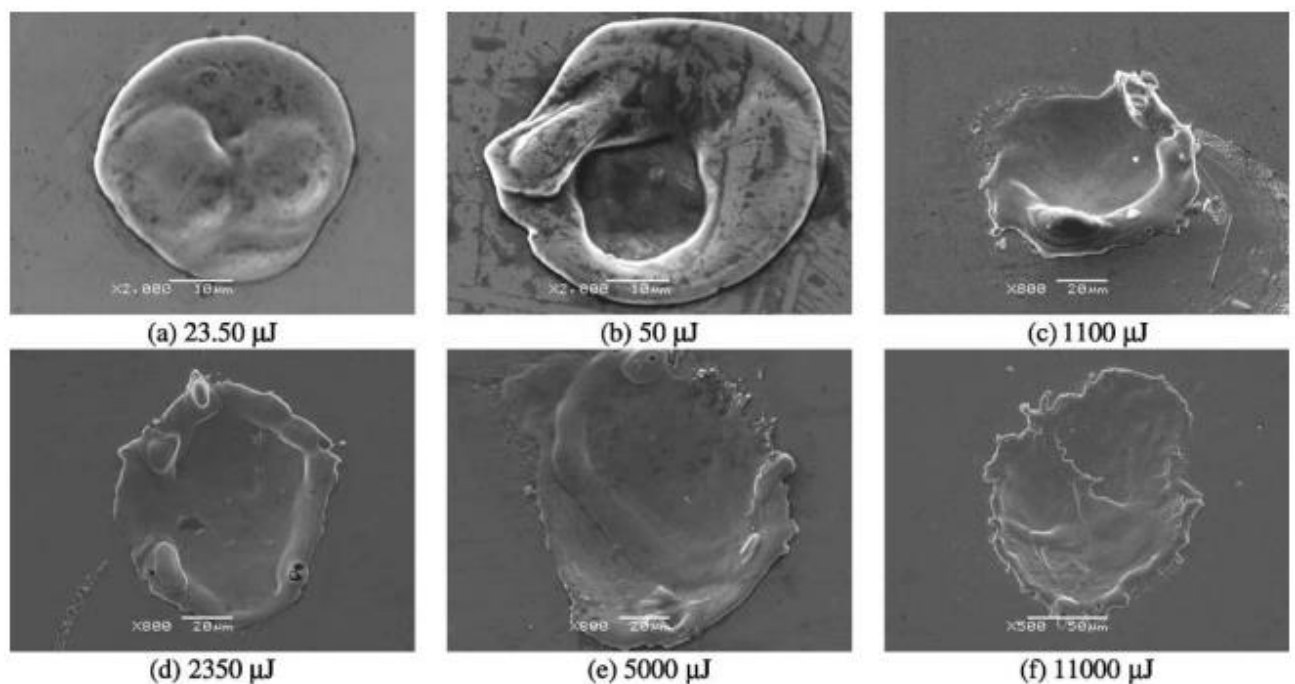
e) La microEDM, cantitatea maximă de energie trebuie să fie limitată pentru a asigura integritatea electrodului-sculă. Astfel cantitatea de material prelevat per descărcare este mică. Craterele la microEDM sunt mult mai mici decât la EDM convențională (**Figura 2.2 a**) [8].

f) La macro EDM, scopul principal este de a asigura o productivitate ridicată, cu precizie și rugozitate acceptabilă. La microEDM, scopul principal este obținerea de suprafețe cu rugozitate redusă și precizie mare. Din această cauză, apare și limitarea energiei de descărcare.

Procesul de microEDM decurge în **condiții dificile din cauza interstițiului de prelucrare foarte îngust (cu dimensiuni cuprinse între  $1 \div 5 \mu\text{m}$ )**, ceea ce creează dificultăți majore privind evacuarea materialului prelevat, generând instabilitatea procesului și productivitatea extrem de mică.

## 2.2. Performanțele microelectroeroziunii

Pentru a înțelege mai bine caracteristicile procesului microEDM, Wong ș.a. [11], au realizat o investigație asupra diferențelor în mecanismul de prelevare a materialului între EDM și microEDM. S-a utilizat un generator pe bază de condensatori ce generează o singură descărcare.



**Figura 2.3** Micro cratere la un interstițiu de lucru de  $2 \mu\text{m}$  pentru diferite energii de descărcare [11]

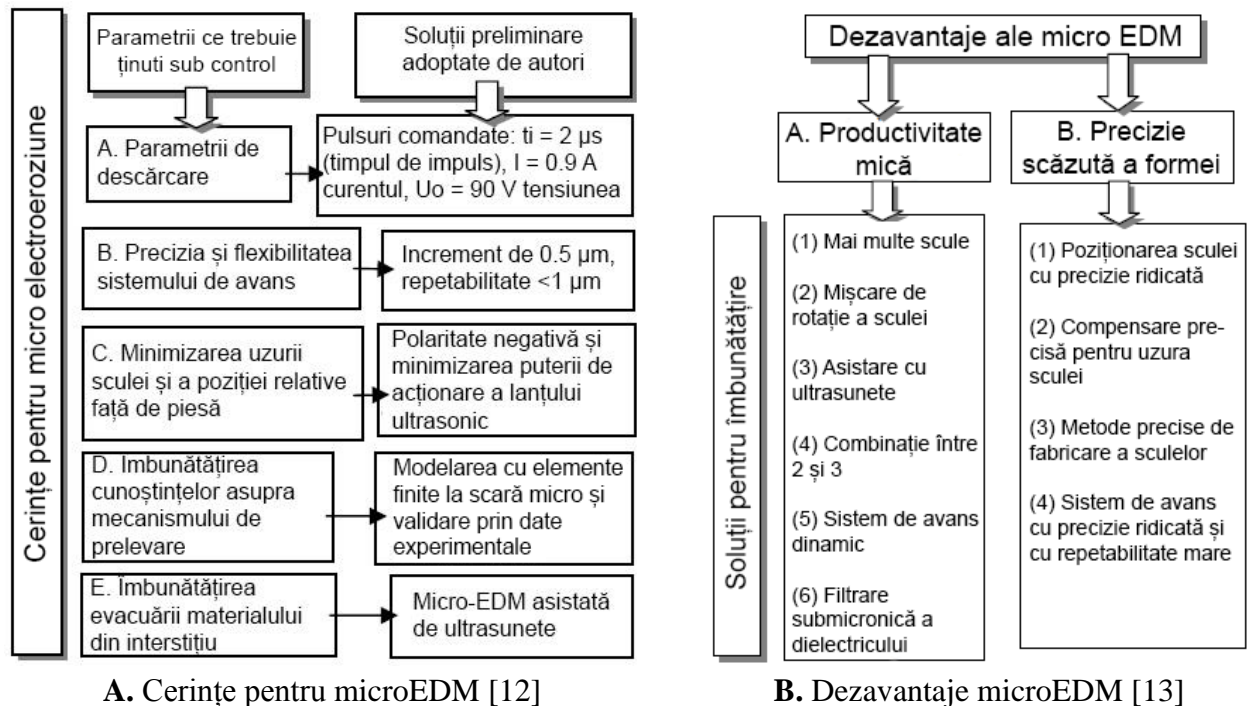
S-a ajuns la următoarele concluzii (**Figura 2.3**) [11]:

- 1) Volumul și diametrul micro craterelor au o variație mai mică la descărcările cu energie mică ( $< 50 \mu\text{J}$ ), în comparație cu cele la energii mari;
- 2) Energia specifică necesară pentru îndepărta materialului este mult mai mică la valori ale energiei de descărcare mici ( $< 50 \mu\text{J}$ ), în comparație cu energii de descărcare mai mari;
- 3) Eficiența cu care este prelevat materialul la energii de descărcare mici ( $< 50 \mu\text{J}$ ), este de 7 – 8 ori mai mare decât la energii de descărcare mari.

### 2.3. Limitări ale microelectroeroziunii

Un proces EDM ideal livrează o cantitate identică de energie și realizează o formă identică a craterului la fiecare descărcare (cazul unui generator EDM izoenergetic). Rata de eficiență a microEDM este estimată a fi între 30 și 50 %, aceasta înseamnă că o parte a descărcărilor nu sunt optime. Producerea unui scurt-circuit, dar și mersul în gol, influențează negativ productivitatea, duc la uzura electrodului-sculă și la abateri de la forma de prelucrat [9].

În **Figura 2.4**, sunt prezentate cerințele pentru un proces de microelectroeroziune stabil (A) și dezavantajele, împreună cu o serie de soluții (B).



**Figura 2.4** Cerințe și dezavantaje ale microEDM

### 2.4. Asistarea cu ultrasunete a microelectroeroziunii

În trend-ul curent al tehnologiei moderne, cererea pentru componente precise și de dimensiuni mici, realizate din materiale extrem de dure, este într-o continuă creștere, astfel că prelucrările convenționale îndeplinesc aceste cerințe din ce în ce mai greu. Prin urmare au fost concepute sistemele hibrid: prelucrarea prin electroeroziune asistată de ultrasunete (EDM+US) și prelucrarea prin microelectroeroziune asistată de ultrasunete (microEDM+US) - care au reușit să sporească stabilitatea procesului, productivitatea și calitatea suprafeței rezultate.

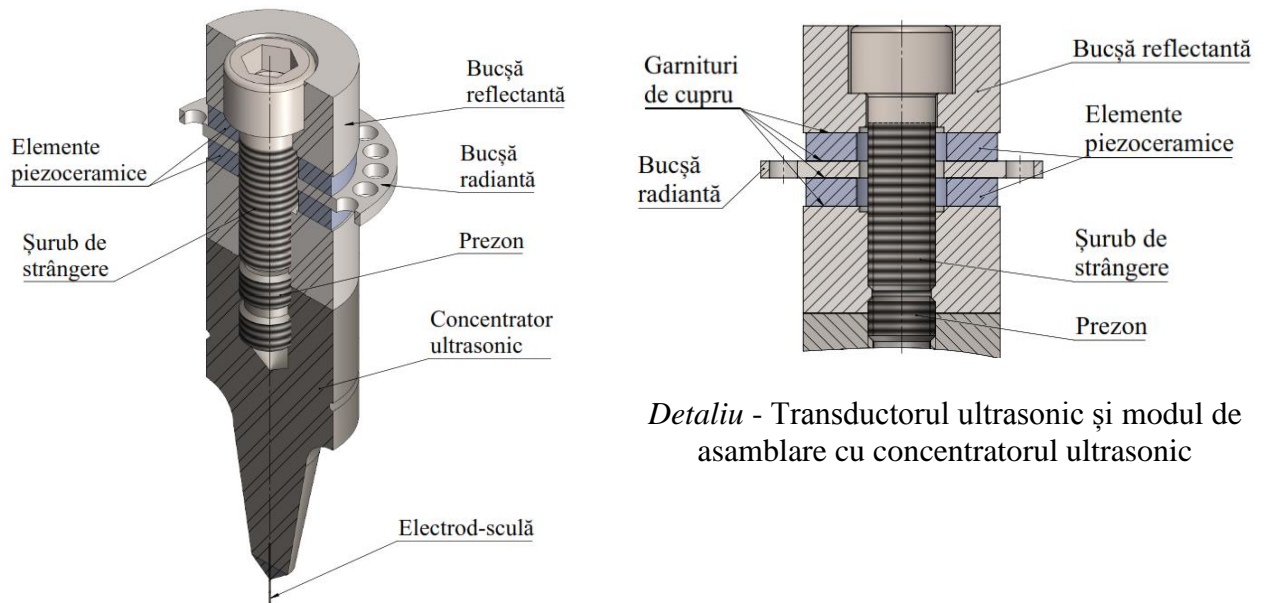
Ultrasunetele (US) sunt unde de frecvență ridicată, care depășesc limita de percepție a auzului uman. În general, o frecvență se consideră ca făcând parte din domeniul ultrasonic dacă depășește 20 KHz ajungând până la 1 GHz [7].

Durata impulsului – la prelucrarea EDM+US are loc o suprapunere a oscilațiilor ultrasonice peste durata descărcărilor (timpul de impuls).

Orice instalație de prelucrare cu ultrasunete are în componență un generator de US, care transformă frecvența industrială de 50 Hz a curentului alternativ de la rețea în frecvență ultrasonică (> 20 kHz) care este ulterior aplicată transductorului din componența lanțului ultrasonic.

Lanțul ultrasonic (**Figura 2.5**), are rolul de a genera vibrațiile ultrasonice și de a le localiza, la amplitudine maximă, în vârful sculei.





Detaliu - Transductorul ultrasonic și modul de asamblare cu concentratorul ultrasonic

Figura 2.5 Structura unui lanț ultrasonic utilizat la microelectroeroziune asistată de ultrasunete

## 2.5. Fenomene de bază la asistarea cu ultrasunete a procesului de electroeroziune

În general, procesele de superfinisare EDM și microEDM se desfășoară într-un interstițiu de lucru de ordinul  $\mu\text{m}$ , ceea ce duce la apariția frecventă a fenomenelor negative, cum ar fi scurt-circuitul sau arcul continuu. Aceste probleme sunt cauzate de evacuarea dificilă a particulelor prelevate în timpul procesului și au un impact semnificativ asupra productivității ( $V_w$ ), uzurii relative volumetrice ( $\theta$ ) și calității suprafeței obținute.

Asistarea cu ultrasunete, cu vibrația cu frecvență ultrasonică a electrozilor-sculă vizează eliminarea instabilității specifice procesului microEDM [12] [13] și sporește performanțele sale de precizie, de calitate a suprafeței și de productivitate.

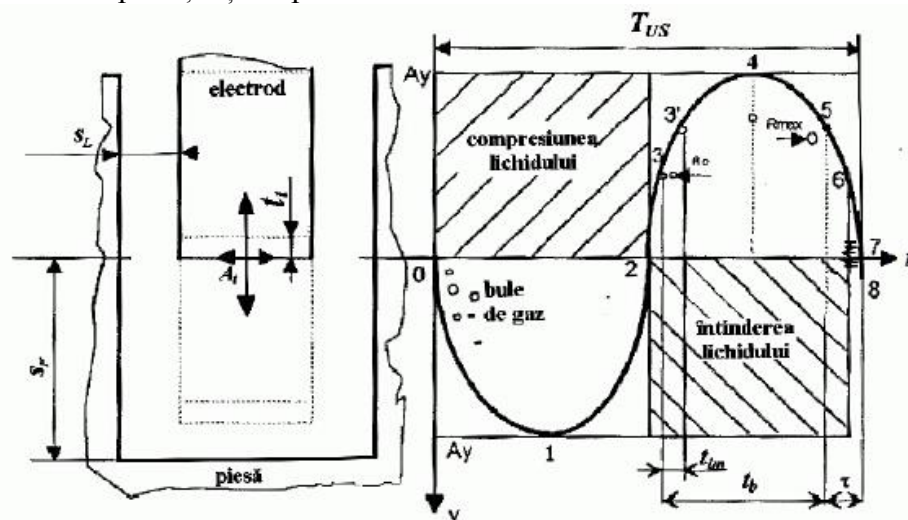


Figura 2.6 Fenomene specifice la EDM+US [15]

Mecanismul de prelevare al materialului la EDM+US are două componente principale:

### I. Fenomene termice (EDM)

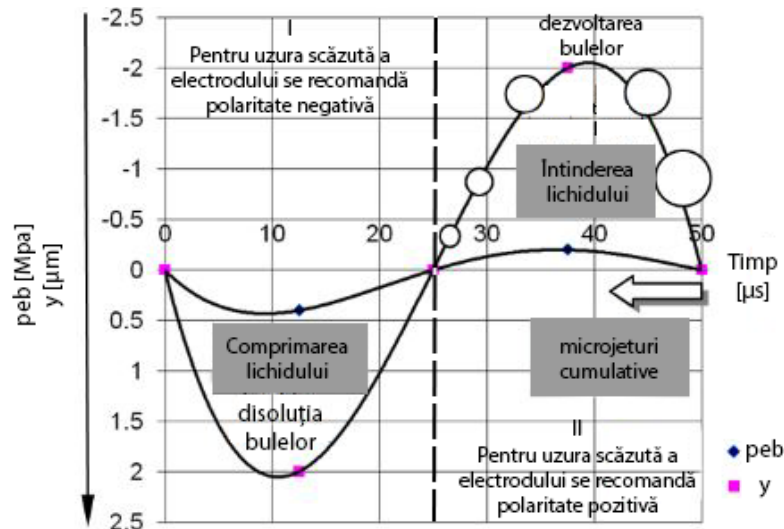
Materialul este prelevat prin topire, vaporizare și chiar fierbere, conform modelului supraîncălzirii, Van Dijck și Snoeys, confirmat de datele experimentale [33] datorită formării unui

canal de plasmă între electrodul-sculă și piesa de lucru precum și formarea unei bule de gaz datorată vaporizării materialului și lichidului dielectric.

## II. Fenomene cavitaționale induse ultrasonic în interstițiul frontal de prelucrare.

Oscilația ultrasonică a electrodului-sculă la prelucrarea electroerozivă este supusă unor restricții specifice legate de amplitudinea ( $A$ ) utilizată. Într-un sistem de referință fix  $tOy$  (atașat instalației EDM, conform **Figura 2.6**), trebuie să se respecte o condiție esențială pentru a evita fenomenele de scurt-circuit în timpul procesului EDM – condiția de stabilitate a procesului [15].

Aceasta presupune că amplitudinea  $A$  să fie mai mică decât interstițiul de prelucrare.



**Figura 2.7** Fenomene cavitaționale induse ultrasonic la EDM+US la o frecvență de 20 kHz [5]

Modelarea procesului EDM asistat de vibrația ultrasonică longitudinală a electrodului-sculă pune în evidență fenomene specifice legate de valorile elongației  $y$ , așa cum este ilustrat în **Figura 2.6**. Perioada de oscilație ( $T_{US}$ ) este împărțită în două semiperioade (**Figura 2.6** și **Figura 2.7**):

### I) În prima semiperioadă se produce compresia lichidului dielectric

Micșorarea interstițiului frontal  $s_F$  din prima semiperioadă favorizează producerea descărcărilor între electrozi.

### II) În a doua semiperioadă (25 – 50 μs) la $f_{US} = 20$ kHz se produce întinderea lichidului dielectric

Presiunea dielectricului din interstițiul de lucru devine negativă și volumul de bule de gaz rezultat dintr-o descărcare electrică, care a apărut anterior, crește până la o valoare corespunzătoare unei presiuni hidraulice ridicate la finalul unei perioade de oscilație. În acest moment, se formează microjeturi cumulative ca rezultat al imploziei bulelor de gaze din interstițiul de lucru [15]. Această fază este caracterizată de presiuni de ordinul a 100 MPa, mult mai mari decât cele de la EDM uzuală, producând valori scăzute ale uzurii relative datorită volumului mare de material îndepărtat prin asistarea ultrasonică.

În timpul **fazei microjeturilor cumulative**, se produc presiuni maxime de ordinul sutelor de MPa – cu orientare paralelă cu suprafața prelucrată, ceea ce permite reducerea rugozității ( $Ra$ ), prin îndepărtarea vârfurilor microgeometriei suprafeței, care au rezistență scăzută la forfecare [15].

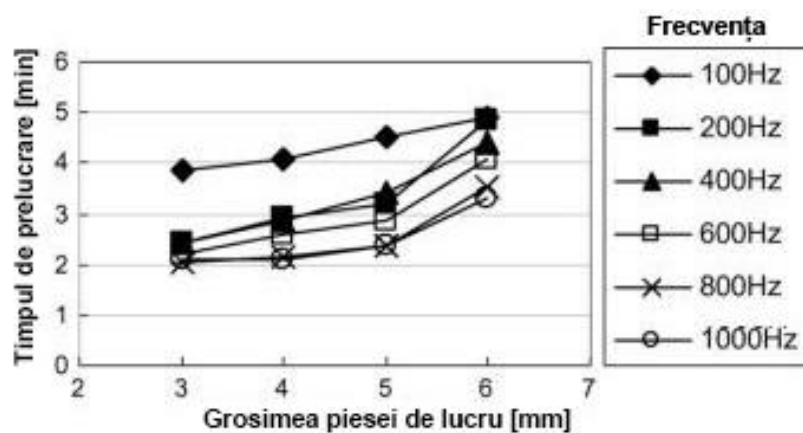
Dezvoltarea canalului de plasmă este oprită de presiunile foarte mari din timpul fazei microjeturilor cumulative.

## 2.6. Performanțele microelectroeroziunii asistate de ultrasunete

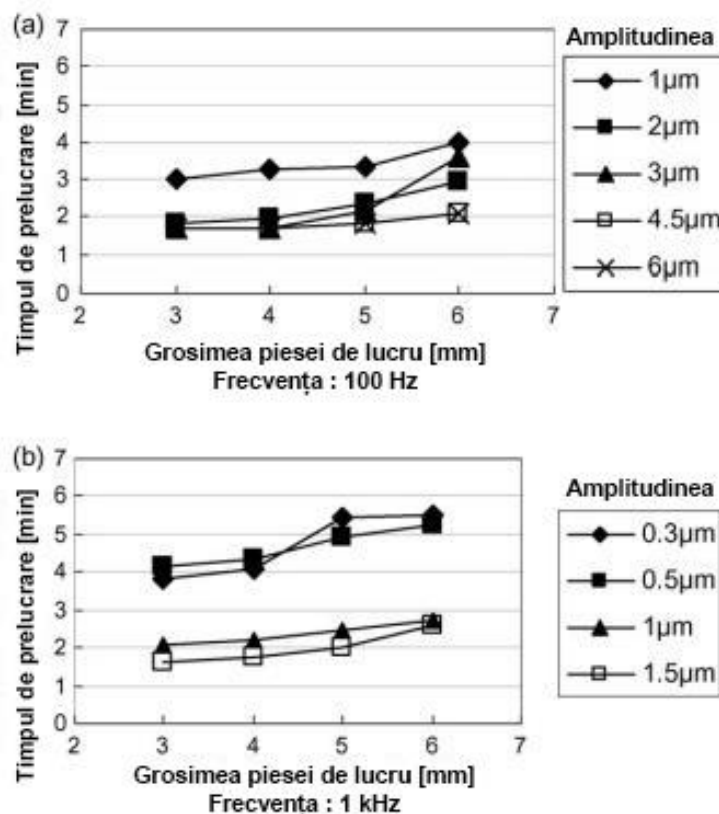
Creșterea productivității, realizarea unor cavități cu un raport de aspect ridicat (raportul dintre adâncime și dimensiunea transversală), îmbunătățirea stabilității procesului, reducerea fenomenelor negative (scurt-circuit, arc continuu), toate acestea se pot realiza prin asistarea cu ultrasunete a procesului de prelucrare. Cauza principală a acestor limitări ale microEDM este dată de spălarea inefficientă a interstițiului de lucru, de ordinul micrometrilor.

Creșterea frecvenței vibrațiilor duce la scăderea timpului de prelucrare (**Figura 2.8**), deoarece evacuarea particulelor este mai eficientă, prin creșterea numărului de faze ale microjeturilor cumulative produse în unitatea de timp.

Efectul vibrației este mic pentru amplitudinile de  $0.3 \mu\text{m}$  și  $0.5 \mu\text{m}$  (**Figura 2.9**). Pentru amplitudinile de  $1 \mu\text{m}$  și  $1.5 \mu\text{m}$  se observă o reducere semnificativă a timpului de prelucrare. Rezultatele pot fi extrapolate principial, și în domeniul vibrațiilor ultrasonice.



**Figura 2.8** Efectele frecvenței vibrațiilor asupra timpului de prelucrare cu  $A = 1 \mu\text{m}$  [17]



**Figura 2.9** Efectele amplitudinii vibrațiilor asupra timpului de prelucrare [17]

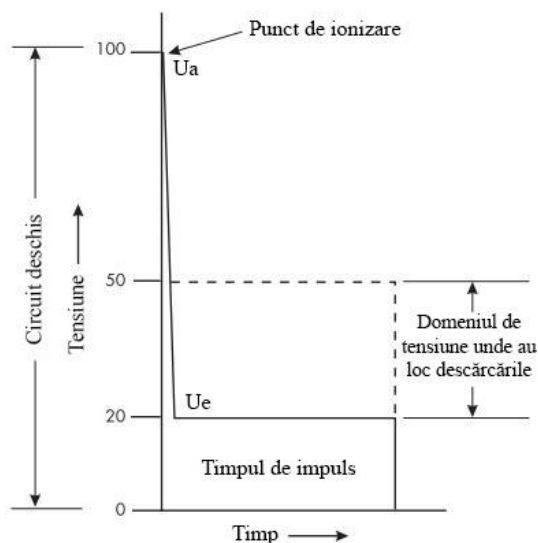
## Capitolul 3. Stadiul actual al dezvoltării sistemelor de avans pentru electroeroziune

O instalație de prelucrare prin electroeroziune este alcătuită din trei ansambluri principale: mașina unealtă propriu-zisă, generatorul de impulsuri electroerozive și alimentarea cu energie electrică (circuitul convențional) și agregatul de lichid dielectric. Aceste subansambluri sunt interdependente unul de altul, nefuncționarea unuia dintre ele duce la incapacitatea operării instalației EDM [18].

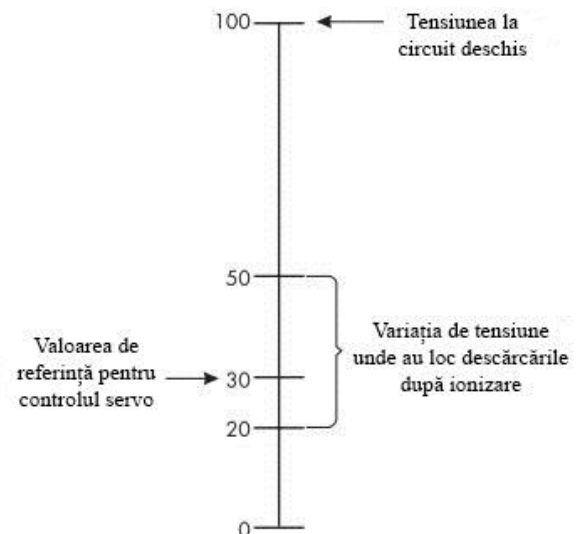
### 3.1. Sistemul de control servo

Sistemul servo ia decizii analogic în funcție de tensiunea de descărcare din interstițiul de lucru sau este posibil, și în funcție de timpul de întârziere la amorsare [18]. Lichidul dielectric este un izolator, până când se aplică tensiunea de amorsare, după care devine un conductor electric. Punctul în care lichidul dielectric devine conductor electric se numește punct de ionizare. Trecerea de la izolator la conductor duce la scăderea tensiunii dintre electrodul-sculă și piesă, de la tensiunea de amorsare ( $U_a$ ) la tensiunea de descărcare ( $U_e$ ), conform **Figura 3.1**.

Odată ce descărcarea are loc, tensiunea de descărcare variază într-un domeniu larg, astfel, este recomandat ca punctul de referință al tensiunii (ce este utilizat de sistemul servo) să fie în domeniul de variație în așa fel încât procesul să fie cât mai stabil [18].



**Figura 3.1** Domeniul de tensiune, atunci când are loc descărcarea [18]



**Figura 3.2** Valoarea de referință din domeniul tensiunii de descărcare [18]

Din domeniul tensiunii de descărcare se va alege o valoare de referință pentru controlul servo sistemului. Tensiunea de referință este comparată cu tensiunea din interstițiul de lucru (conform **Figura 3.2**). Diferența dintre cele două valori este utilizată pentru a transmite mișcări de avans, retragere sau menținere a electrodului-sculă.

### 3.2. Poziționarea și precizia sistemelor de avans

Timpul de răspuns între comanda mișcării de avans/retragere și execuția acesteia trebuie să fie mai mic de 10 ms în condițiile prelucrărilor de finisare, ce presupun un interstițiu frontal de prelucrare mai mic de 10  $\mu\text{m}$  [14].

Cerințele pentru realizarea sistemelor de avans pentru micro prelucrări sunt:

1. Viteza de reacție a sistemului de avans;
2. Precizia geometrică și de poziționare mare;
3. Optimizarea procesului microelectroeroziv pentru a realiza minimizarea uzurii și calitatea ridicată a suprafeței prelucrate.

Elementul de bază de la care se pleacă, pentru optimizarea tehnologiilor EDM, este dinamica adecvată a sistemului de avans electroeroziv. Aceasta este exprimată prin timpul de răspuns al sistemului ( $\Delta t$ ) conform relației [14]:

$$\Delta t = \Delta t_{MPP} + \Delta t_j + \Delta t_f + \Delta t_e \text{ [s]} \quad (3.1)$$

unde:  $\Delta t_{MPP}$  – întârzierea produsă de motorul de acționare al sistemului de avans [s];  $\Delta t_j$  – întârzierea produsă de preluarea jocurilor din sistem [s];  $\Delta t_f$  – întârzierea datorată învingerii forțelor de frecare [s];  $\Delta t_e$  – întârzierea cauzată de elementele elastice ale sistemului de avans [s].

Interstițiul de lucru trebuie să fie suficient de mare pentru a permite evacuarea particulelor prelevate, și suficient de mic pentru a permite cât mai multe descărcări în timpul procesului de prelucrare.

### 3.3. Sisteme de control de bază

Scopul oricărui sistem electronic de control este de a măsura, monitoriza și controla un anumit proces. Un mod de a monitoriza un proces este prin compararea datelor de ieșire cu datele de intrare pentru a reduce diferența dintre rezultatul obținut și rezultatul programat.

**Avantaje:** Precise, facilitează automatizarea, permite adaptarea la perturbații;

**Dezavantaje:** Greu de proiectat, costuri mari de achiziție și mentenanță.

Pentru controlul procesului de electroeroziune, există diverse sisteme de control [15] și anume:

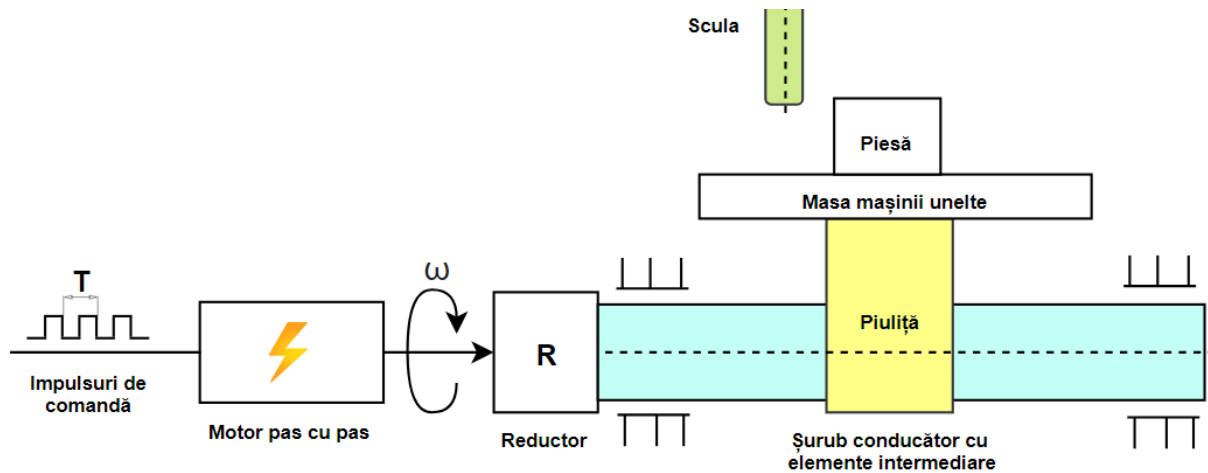


Figura 3.3 Structura unui sistem de control deschis, după [15]

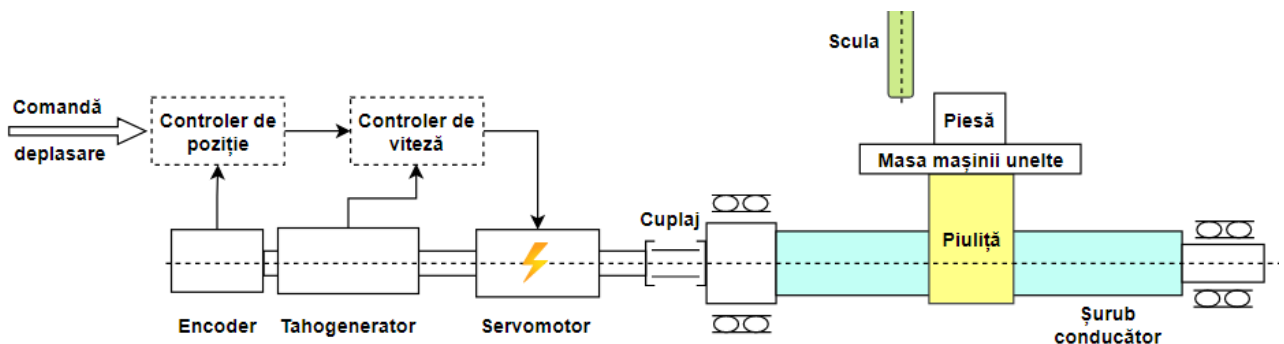


Figura 3.4 Structura unui sistem de control semi-închis, după [15]





## Capitolul 4. Concluzii privind stadiul actual al dezvoltării microelectroeroziunii asistate de ultrasunete și a sistemelor de avans

În urma analizei și cercetării stadiului actual al electroeroziunii, electroeroziunii asistate de ultrasunete și al dezvoltării sistemelor de avans s-au desprins mai multe concluzii semnificative, pe baza cărora se va elabora **partea a II-a Contribuții la realizarea sistemelor de avans pentru microelectroeroziune asistată de ultrasunete**. Concluziile sunt:

### 1. Parametrii de proces la EDM și microEDM:

- Valorile parametrilor electrici și non-electrici au un impact semnificativ asupra performanțelor tehnologice ale procesului EDM. Tensiunea de descărcare, curentul de descărcare, timpul de impuls și capacitatea condensatorilor de la generatoarele de relaxare sunt reglate de sisteme automate adaptive pentru a optimiza productivitatea, rugozitatea suprafeței prelucrate și uzura electrodului-sculă;
- Timpul de pauză în procesul EDM este crucial pentru stabilitatea procesului și evacuarea eficientă a materialului preluat. Este necesar un raport optim între timpul de impuls și timpul de pauză pentru a evita scurt-circuitul și pentru a menține productivitatea;
- Rezistența electrică a cuplului de materiale electrod sculă – piesă, precum și conductivitatea locală a lichidului dielectric din interstițiul de lucru influențează energiile de descărcare, cu un impact direct asupra eficienței procesului EDM;
- Metodele de spălare și presiunea de spălare afectează stabilitatea procesului microEDM care are loc în condiții dificile determinate de interstițiul de prelucrare cu valori de 1 – 5 μm. Combinarea adecvată a acestor metode duce la îmbunătățiri semnificative ale parametrilor tehnologici de ieșire ai procesului de prelucrare.

### 2. Microelectroeroziune asistată de ultrasunete (microEDM+US):

- Procesul de microEDM are limitări în ceea ce privește dimensiunea electrodului-sculă și interstițiul de prelucrare și asupra energiilor de descărcare, ceea ce determină o productivitate redusă în comparație cu EDM;
- Asistarea cu ultrasunete aduce beneficii semnificative asupra performanțelor tehnologice ale microEDM prin adăugarea unui mecanism de prelevare suplimentar generat de fenomenele cavitaționale induse ultrasonic din interstițiul de prelucrare;
- Frecvența și amplitudinea vibrațiilor ultrasonice pot fi ajustate pentru a îmbunătăți evacuarea materialului și calitatea suprafeței prelucrate. Acești parametri, precum și aceia ai regimului de prelucrare microEDM pot fi optimizați pentru a obține cele mai bune rezultate.

### 3. Sistemele de avans:

- Există un timp de răspuns al sistemelor de avans electromecanice de ordinul ms, care scoate în evidență importanța reducerii acestuia;
- Timpul de răspuns optim este esențial pentru precizia procesului, calitatea suprafeței, productivitate și uzura sculei. Un timp de răspuns redus asigură o prelucrare eficientă;
- Implementarea unui sistem de avans cu timp de răspuns scăzut poate maximiza beneficiile procesului microEDM+US prin îmbunătățirea eficienței evacuării materialului din interstițiul de lucru.

## Capitolul 5. Obiectivele, direcțiile de cercetare și metodologia abordate în teza de doctorat

### 5.1. Sinteza aspectelor critice privind stadiul actual al dezvoltării microelectroeroziunii asistate de ultrasunete și a sistemelor de avans

1. Tendința actuală de ultra-miniaturizare din domeniul tehnologiilor de prelucrare, de reducere a dimensiunilor suprafețelor generate, care răspunde provocărilor impuse de Industria 4.0 este aceea în care se încadrează și tehnologia de microelectroeroziune asistată de ultrasunete. Creșterea vitezei de transmitere, a capacității de stocare a informației și a vitezei de acționare a elementelor unui sistem tehnologic sunt în strânsă conexiune cu concentrarea energiilor pe spații foarte mici pentru prelucrarea materialelor și componentelor. Aceasta este caracteristica tehnologiilor neconvenționale, denumite și tehnologii cu energii concentrate, cazul microEDM.

2. Microelectroeroziunea uzuală are capacitatea de a prelucra suprafețe de dimensiuni foarte reduse, la costuri mai mici decât alte tehnologii similare din domeniul micro, utilizând diverse sisteme tehnologice, la care sistemul de avans - poziționarea electrodului-sculă în raport cu suprafața prelucrată – are un rol esențial în desfășurarea procesului de îndepărtare a materialului. Domeniul micro este cuprins în intervalul 1 - 999  $\mu\text{m}$  conform accepțiunii CIRP (College International pour la Recherche en Productique / The International Academy for Production Engineering).

3. Limitările microelectroeroziunii sunt legate de instabilitatea procesului determinată de dimensiunea interstițiului de prelucrare (în general de 1-5  $\mu\text{m}$ ) în conexiune cu energia descărcărilor foarte redusă, în intervalul  $10^{-9} - 10^{-5}$  J, volumul de material îndepărtat: 0.05 – 500  $\mu\text{m}^3$  și evacuarea dificilă a particulelor prelevate din interstițiul de prelucrare – spălare inefficientă. În aceste condiții, apar fenomene frecvente de scurt-circuit între electrodul-sculă și suprafața prelucrată, care sunt însoțite de scăderea productivității prin cursele repetate de retragere și apropiere ale electrodului-sculă, efectuate de sistemul de avans dar și reducerea calității (deteriorarea) suprafeței prelucrate.

4. Specificitatea desfășurării procesului de microelectroeroziune în condițiile vibrației longitudinale a electrodului-sculă cu frecvență ultrasonică, în cazul de față, circa 20 kHz și mai uzual, 40 kHz, presupune modificarea interstițiului de prelucrare frontal cu această frecvență prin elongația electrodului-sculă - amplitudine de ordinul micrometrilor - care este poziționat la capătul lanțului ultrasonic într-un punct de amplitudine maximă (ventru), ceea ce adaugă o instabilitate suplimentară.

5. Pe lângă această potențială instabilitate suplimentară a microEDM+US, cavitația indusă ultrasonic în interstițiul de prelucrare îmbunătățește procesul de îndepărtare a materialului cu condiția ca sistemul de avans la procesul microEDM+US să nu producă scurt-circuit între suprafețele electrodului-sculă și a piesei de lucru. Prin efectul de variație a presiunii hidrostatice în interstițiul de prelucrare – pompare a lichidului dielectric deci spălare și evacuare îmbunătățită, are loc prelevarea suplimentară a materialului în stare solidă și lichidă a materialului datorită imploziei bulelor de gaz din interstițiul de prelucrare la fiecare final de semiperioadă de întindere a lichidului dielectric.

6. Asistarea cu ultrasunete a microEDM poate conduce la creșterea de productivitate de câteva ori, a calității suprafeței prelucrate și a reducerii uzurii volumetrice relative, ceea ce justifică cercetările pentru realizarea unui sistem de avans adecvat pentru microEDM+US.

7. În condițiile de prelucrare la microEDM+US, sistemul de avans trebuie să îndeplinească condiții suplimentare, îmbunătățite față de sistemul de avans de la microEDM uzuală:

- deplasarea electrodului-sculă cu valori incrementale ( $i$ ) foarte reduse pentru a preveni fenomenele de scurt-circuit între electrodul-sculă și suprafața frontală prelucrată, cu atât mai critice în cazul unui interstițiu frontal în intervalul 1 - 5  $\mu\text{m}$ , care se modifică cu valorile elongației electrodului-sculă, de ordinul micrometrilor și care depinde de amplificarea dată de concentratorul ultrasonic, la fiecare perioadă ultrasonică,  $T_{us}=25\mu\text{s}$ , dacă frecvența este  $f_{us} = 40 \text{ kHz}$ ;

- dinamica foarte bună privind execuția comenzilor de retragere și apropiere, care se evaluează prin timpul de răspuns ( $\Delta t$ ) al execuției comenzii de avans sau retragere, cel mult 10 ms;

- prinderea lanțului ultrasonic într-un plan nodal, astfel încât vibrațiile ultrasonice ale lanțului ultrasonic care integrează scula să nu se propage în interiorul sistemului de avans.

7. Construcția sistemului de avans la microEDM+US trebuie să includă elemente de reducerea timpului de răspuns ( $\Delta t$ ) prin scăderea inerției motorului de acționare a sistemului de avans; reducerea deformației elastice la aplicarea cuplului de rotație; reducerea frecărilor șurub-piuliță; reducerea jocului dintre flancurile filetelor șurubului și piuliței.

8. Performanțele sistemelor de avans pentru microelectroeroziune asistată de ultrasunete pot fi evaluate cu ajutorul celor patru parametri: precizia de poziționare, rezoluția (mărimea incrementului), dinamica (timpul de răspuns al execuției comenzii de avans și retragere) și nivelul vibrațiilor din cadrul sistemului de avans.

Analiza critică, a aspectelor relevante din stadiul actual a stat la baza formulării sistemice a obiectivelor tezei.

## 5.2. Direcții de cercetare și metodologia de cercetare ale tezei de doctorat

**Direcțiile de cercetare majore ( $D_i$ )** pe care se va acționa în cadrul tezei de doctorat vor fi următoarele, cu posibile particularizări ale unor subdirecții, care se vor dovedi importante cu privire la creșterea performanțelor sistemelor de avans pentru microelectroeroziune asistată de ultrasunete și a procesului de prelucrare a materialului aflat în conexiune:

- (D1) Proiectarea conceptuală și aplicarea unor metode de îmbunătățirea calității asupra unui sistem de avans pentru microelectroeroziune asistată de ultrasunete;
- (D2) Proiectarea detaliată a unui sistem de avans pentru microelectroeroziune asistată de ultrasunete;
- (D3) Proiectarea detaliată a unui dispozitiv de prindere a lanțului ultrasonic, care integrează electrodul-sculă, pentru un sistem de avans pentru microelectroeroziune asistată de ultrasunete;
- (D4) Modelarea și simularea funcționării unui sistem de avans pentru microelectroeroziune asistată de ultrasunete;
- (D5) Realizarea unui sistem de avans pentru microelectroeroziune asistată de ultrasunete;
- (D6) Realizarea unui lanț ultrasonic care integrează electrodul-sculă pentru microelectroeroziune asistată de ultrasunete;
- (D7) Testarea sistemului de avans pentru microelectroeroziune asistată de ultrasunete;
- (D8) Testarea unui lanț ultrasonic care integrează electrodul-sculă pentru microelectroeroziune asistată de ultrasunete;

## 5.3. Obiective ale tezei de doctorat

În urma analizei critice a stadiului actual al sistemelor tehnologice pentru microEDM și respectiv microEDM+US, și în mod deosebit al sistemelor de avans adecvate pentru microEDM+US, au fost stabilite: **un obiectiv principal ( $O_p$ )** și mai multe **obiective specifice ( $O_{si}$ )**.

Pentru a facilita obținerea lor, acestea au fost formulate într-o succesiune logică, graduală, după cum se prezintă în continuare:

**Op:** **Obiectivul principal al tezei de doctorat este acela de a proiecta, realiza și testa un sistem de avans performant pentru procesul de prelucrare prin microelectroeroziune asistată de ultrasunete.**

S-a urmărit trecerea de la etapa de concept, gradul de maturitate tehnologică (technology readiness level) TRL 2, la aceea de model funcțional în condiții de laborator, respectiv TRL 4 [34] [35] [36].

S-au stabilit mai multe **obiective specifice** (subordonate), detaliate din obiectivului principal, după cum urmează:

- Os1:** Proiectarea conceptuală a unui sistem de avans pentru prelucrarea prin microelectroeroziune asistată de ultrasunete – TRL 2;
- Os2:** Aplicarea unor metode de îmbunătățire a calității sistemului de avans pentru microelectroeroziune asistată de ultrasunete;
- Os3:** Proiectarea detaliată a unui sistem de avans performant pentru microelectroeroziune asistată de ultrasunete;
- Os4:** Proiectarea detaliată a unui lanț ultrasonic, care integrează electrodul-sculă;
- Os5:** Proiectarea detaliată a unui dispozitiv de prindere a lanțului ultrasonic;
- Os6:** Modelarea și simularea funcționării unui sistem de avans pentru microelectroeroziune asistată de ultrasunete;
- Os7:** Modelarea și simularea funcționării unui lanț ultrasonic care integrează electrodul-sculă;
- Os8:** Realizarea fizică a unui sistem de avans performant pentru microelectroeroziune asistată de ultrasunete;
- Os9:** Realizarea fizică a unui lanț ultrasonic care integrează electrodul-sculă;
- Os10:** Testarea unui sistem de avans pentru microelectroeroziune asistată de ultrasunete în condiții de laborator – TRL 4;
- Os11:** Testarea unui lanț ultrasonic care integrează electrodul-sculă în condiții de laborator – TRL 4;

#### 5.4. Metodologia de cercetare

Metodologia de cercetare-dezvoltare concepută pentru atingerea obiectivului principal și obiectivelor secundare cuprinde următoarele etape:

- E1.** Analiza critică a stadiului actual al sistemelor tehnologice pentru microEDM și respectiv microEDM+US, precum și a sistemelor de avans adecvate pentru microEDM+US;
- E2.** Proiectarea conceptuală a unui sistem de avans performant adecvat pentru microEDM+US – nivelul 2 de maturitate tehnologică, **TRL 2**;
- E3.** Îmbunătățirea unui sistem de avans proiectat prin aplicarea unor metode consacrate (recunoscute) de îmbunătățirea calității;
- E4.** Proiectarea unui sistem de prindere a lanțului ultrasonic, care integrează scula, având în vedere poziția punctului nodal (amplitudine minimă de oscilație a undelor ultrasonice) astfel încât nivelul vibrațiilor să fie redus în cadrul sistemului de avans;
- E5.** Modelarea și simularea unui sistem de avans cu parametrii obiectiv esențiali – frecvența proprie și deformațiile acestuia în anumite condiții critice de funcționare relevante;

- E6.** Modelarea și simularea unui lanț US care integrează scula cu obținerea condiției de rezonanță, maximizarea amplificării și determinarea punctului nodal;
- E7.** Proiectarea procesului tehnologic și execuția unui sistem de avans performant, precum și a lanțului US, care integrează scula și sistemul de prindere;
- E8.** Testarea unui sistem de avans și a lanțului US, care integrează scula în condiții de laborator – nivelul 4 de maturitate tehnologică, **TRL 4**.

## Capitolul 6. Proiectarea conceptuală a sistemului de avans pentru microelectroeroziune asistată de ultrasunete

### 6.1. Formularea funcțiilor sistemului de avans

Sistemul de avans este un mecanism care: deplasează scula (piesa) pentru efectuarea operațiilor de prelucrare, poziționează (orientează) scula/piesa în vederea efectuării unor operații tehnologice, după o axă liniară/circulară (de rotație), asigură creșterea preciziei de prelucrare fie prin noi concepte referitoare la mașina-unealtă (hardware mecanic), fie corectează în timp real poziția sculei în raport cu sistemul de coordonate (software) și permite realizarea unor procedee de prelucrare inovative.

Un sistem de avans pentru microEDM+US are ca **funcție generală** poziționarea electrodului-sculă. Funcția generală asigură obținerea unui interstițiu frontal optim pentru producerea descărcărilor EDM între electrodul-sculă și piesă, în condițiile variației acestui interstițiu odată cu vibrațiile ultrasonice ale electrodului-sculă.

Funcțiile sistemului de avans sunt prezentate sintetic în **Tabelul 6.1**.

**Tabelul 6.1** Funcția generală și funcțiile principale ale sistemului de avans pentru microEDM+US

<b>Funcția generală (FG) - Poziționarea electrodului-sculă pentru producerea descărcărilor în condiții de microEDM+US</b>	
<b>Nr.</b>	<b>Funcția principală</b>
Fp1	Execuția deplasărilor de avans/retragere
Fp2	Măsurarea analogică și indicarea continuă a poziției
Fp3	Execuția deplasărilor cu profil de viteză și accelerație
Fp4	Transformarea mișcării de rotație în mișcare de translație
Fp5	Perpendicularitatea sistemului de avans pe masa mașinii
Fp6	Execuția deplasărilor cu timp de răspuns minim și solicitări minime ale sistemului de avans
Fp7	Minimizarea transmiterii vibrațiilor în sistemul de avans
Fp8	Reglarea înclinării sistemului de avans pentru găuri înclinate
Fp9	Funcționarea sistemului de avans în afara rezonanței
Fp 10	Deplasarea cu increment liniar submicronic

## 6.2. Identificarea soluțiilor

În continuare este elaborat un tabel pentru soluții de adoptat (**Tabelul 6.2**) pentru fiecare funcție. În tabel, s-au marcat cu gri soluțiile adoptate.

**Tabelul 6.2** Soluții pentru funcțiile principale ale sistemului de avans

Funcția principală	Structură/Bloc	Soluții			
		A	B	C	D
Fp1. Execuția deplasărilor de avans/retragere	Executare mișcare	Șurub-piuliță	Cilindru pneumatic	Cilindru hidraulic	...
Fp2. Măsurarea analogică și indicarea continuă a poziției	Sistem de monitorizare Sistem de execuție	Sistem de monitorizare oferit de elementul de acționare (driver)	Sistem de monitorizare creat specific pentru aplicație (personalizat)	-	...
Fp3. Execuția deplasărilor cu profil de viteză și accelerație					
Fp6. Execuția deplasărilor cu timp de răspuns minim					
Fp4. Transformarea mișcării de rotație în mișcare de translație	Elemente conexe	Coloană de ghidare și rolă	-	-	...
Fp5. Perpendicularitatea sistemului de avans pe masa mașinii	Elemente conexe	Placă de prindere	-	-	...
Fp7. Minimizarea transmiterii vibrațiilor în sistem	Elemente conexe	Suprafață mică de contact	Izolare prin piese de plastic/cauciuc	-	...
Fp10. Deplasarea cu increment liniar submicronic	Element de acționare	Motor electric	Motor hidraulic	Motor ultrasonic	...
Fp2. Măsurarea analogică și indicarea continuă a poziției (monitorizare proces)	Sistem de monitorizare proces	Sistem de monitorizare a tensiunii de descărcare	Sistem de monitorizare a tipurilor de descărcări	-	...
Fp8. Reglarea înclinării sistemului de avans pentru găuri înclinate	Elemente de suport ale sistemului de execuție	Placă rotativă, șuruburi, piulițe și șaibe			
Fp9. Funcționarea sistemului de avans în afara rezonanței	Element de conectare lanț ultrasonic	Prisme	Prindere în vârfuri	-	...



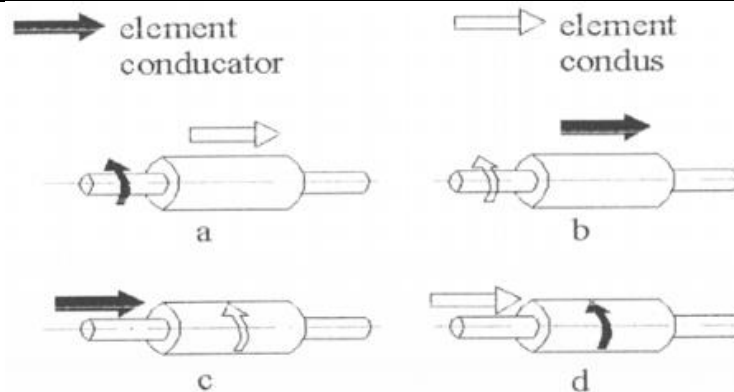
## 6.3. Selectarea variantelor de soluții

### 6.3.1. Mecanismul tip șurub-piuliță

**Funcțional**, transmisiile cu șurub de mișcare se regăsesc în **Tabelul 6.3**, iar grafic sunt reprezentate în **Figura 6.1** [20].

**Tabelul 6.3** Variante funcționale de transmisii

Varianta	Element conducător / mișcare	Element condus / mișcare
a	Șurubul / rotație	Piulița / translație
b	Piulița / translație	Șurubul / rotație
c	Șurubul / translație	Piulița / rotație
d	Piulița / rotație	Șurubul / translație



**Figura 6.1** Variante funcționale pentru transmisiile șurub-piuliță [20]

Mecanismul șurub-piuliță cu role este aplicabil la sisteme de avans. Sarcina este transmisă de la piuliță la arbore prin suprafețele cilindrice ale tuturor roleurilor implicate. Diametrul suprafeței de contact este mărit substanțial odată cu numărul de puncte de contact.

Din punct de vedere **funcțional**, elementul conducător este șurubul, executând o mișcare de rotație (**Tabelul 6.3**), iar din punct de vedere **constructiv**, este ales un sistem șurub-piuliță cu role.

### 6.3.2. Cuplajul

Pentru sistemul de avans este ales un cuplaj tip flexibil pentru compensarea necoaxialității arborelui motorului cu arborele șurubului, cu riscul adăugării la timpul de răspuns al sistemului de avans. Această alegere este justificată prin faptul că, deși introduce o întârziere (prin flexibilitate), aceasta poate fi compensată sau redusă sub o valoare care nu afectează semnificativ precizia sistemului.

### 6.3.3. Motorul de acționare

Tipurile de motoare electrice, cel mai utilizate în industrie sunt: motorul servo și motorul pas cu pas. Niciunul din ele nu este o soluție universală pentru toate tipurile de aplicații. Alegerea tipului de motor depinde în principal de viteză, accelerație și preț.

#### A. Motorul pas cu pas

Motorul pas cu pas (MPP) este un dispozitiv electromecanic care convertește un tren de impulsuri digitale într-o mișcare liniară sau rotațională proporțională cu numărul de impulsuri. Rotorul se deplasează în trepte unghiulare discrete și succesive, de mărimi egale, denumite pași ai motorului. Pentru a funcționa corect, numărul de pași efectuați de motor trebuie să corespundă cu numărul impulsurilor de comandă aplicate acestuia.

## B. Motorul servo

A fost identificată o categorie de motoare denumite micro motor pas cu pas, ale căror dimensiuni ale suprafeței de montaj Lxl sunt 60 x 60 mm. Din această categorie, se extrage **Tabelul 6.4** [21], în care sunt prezentate mai multe modele de motoare pas cu pas. Din acest tabel este selectat MPP cu cinci faze **CRK564PMBP**, care are cea mai mică inerție a rotorului cu scopul de a evita pe cât posibil deplasarea remanentă după executarea comenzii – cu cât mișcarea remanentă este mai mare cu atât precizia de poziționare scade.

**Tabelul 6.4** Caracteristici motor pas cu pas [21]

Model	Un singur arbore	<b>CRK564PMAP</b>	<b>CRK566PMAP</b>	<b>CRK569PMAP</b>
	Doi arbori	<b>CRK564PMBP</b>	<b>CRK566PMBP</b>	<b>CRK569PMBP</b>
<b>Caracteristică</b>	<b>Unitate măsură</b>			
Cuplul maxim de menținere	N*m	0.78	1.3	2.3
Inerția rotorului	J/Kg*m <sup>2</sup>	320*10 <sup>-7</sup>	500*10 <sup>-7</sup>	1100*10 <sup>-7</sup>
Pas unghiular	°	0.36		
Modul de excitație	-	Micropas		

### 6.4. Aplicarea detaliată a metodei Desfășurării funcției calității

Desfășurarea funcției calității, *Quality Function Deployment* (QFD) reprezintă un sistem structurat care facilitează identificarea cerințelor și așteptărilor clienților și le traduce într-un limbaj tehnic ca răspuns al organizațiilor la aceste cerințe. Scopul acestui sistem constă în interpretarea și integrarea “*vocii clientului*” în caracteristicile calității produselor, proceselor și serviciilor, astfel încât să se poată satisface nevoile și așteptările clienților – răspunsul tehnic sau vocea companiei.

Rezultatul este prezentat în **Figura 6.2**.

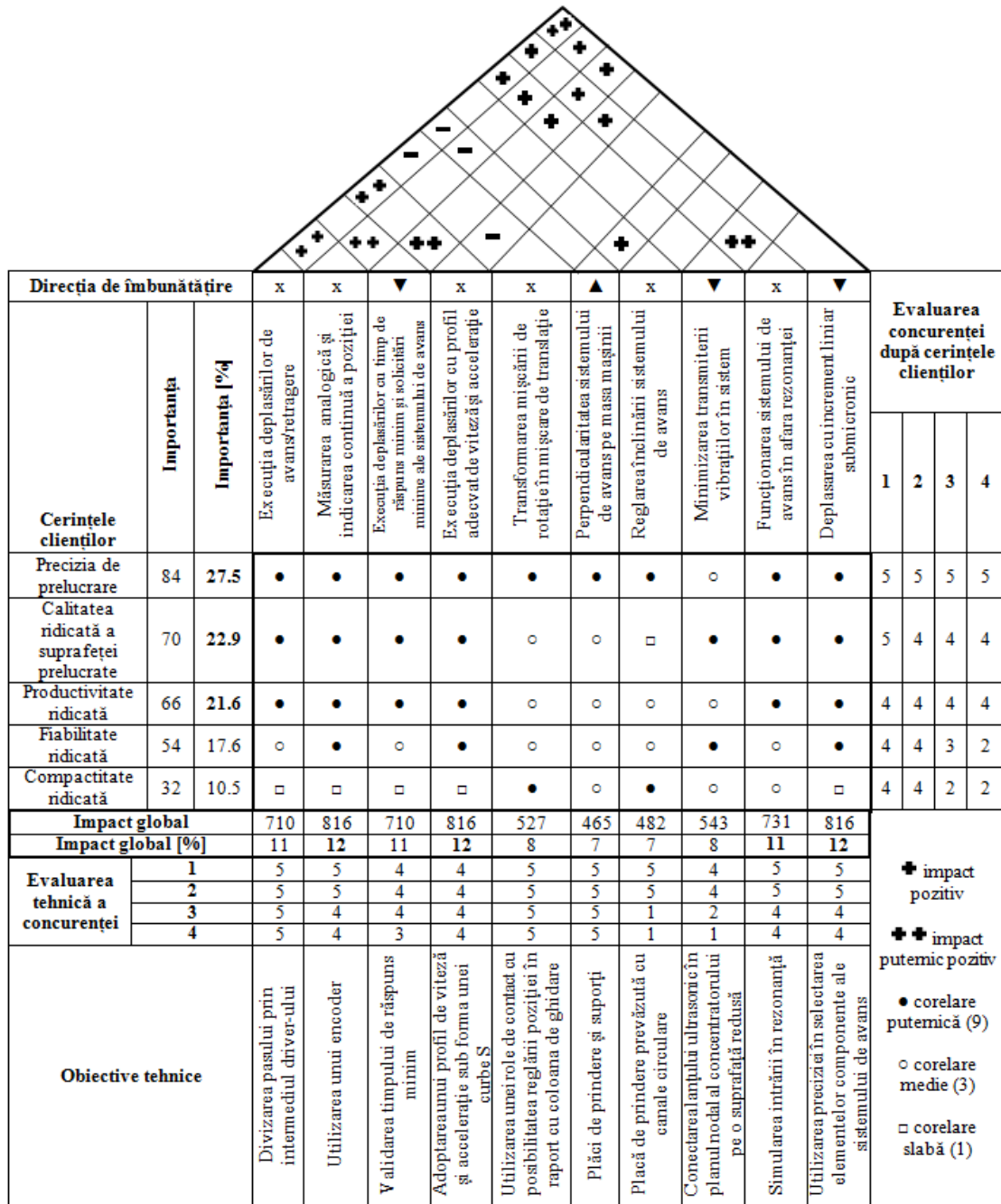


Figura 6.2 Matricea QFD

## 6.5. Aplicarea detaliată a metodei Analiza modurilor de defectare și a efectelor acestora

FMEA (Failure Mode and Effects Analysis) este o metodă sistematică de identificare și prevenire a problemelor produsului înainte de apariție.

Această metodă analitică are ca obiectiv prevenirea defectelor, îmbunătățirea siguranței produsului sau procesului și, în final, creșterea satisfacției clienților.

Aceasta se dovedește extrem de eficientă atunci când este aplicată în stadiile incipiente ale dezvoltării, înainte de fabricarea produsului. Cu toate acestea, în cazul produselor cu complexitate mare, cum ar fi sistemul de avans pentru microelectroeroziune asistată de ultrasunete, deși necesară, metoda FMEA/AMDEC poate deveni dificil de aplicat. Prin urmare se recomandă adesea utilizarea concomitentă a altor metode complementare pentru o abordare cât mai comprehensivă [22] [23].

Tabelul 6.5 FMEA pentru sistemul de avans

Analiza modurilor de defectare și a efectelor acestora											Rezultatul acțiunilor					
Nr. crt.	Componenta	Defectare	Efectul defectului	Severitate	Cauza defectării	Apariție	Măsuri de depistare și control	Detectare	RPN	Măsuri recomandate de înlăturare	Responsabilitate / termen	Acțiune de remediere	Severitate	Apariție	Detectare	RPN
1	Motor	Execută mai puțini pași decât comandați	Precizie scăzută de poziționare	7	Alegerea greșită a MPP	3	Simulare funcțională	6	126	Schimbare MPP	Proiectant Manager / 1 zi	Verificarea incrementului unghiular al MPP	7	1	1	7
		Execută cu întârziere pașii comandați	Precizie scăzută de poziționare	7	Alegerea greșită a MPP	4	Simulare funcțională	6	168	Schimbare MPP	Proiectant Manager / 1 zi	Verificarea traseului de comandă electronic	7	1	1	7
		Nu recepționează comenzi	Nu poate fi utilizat	8	Montarea greșită a conexiunilor	3	Simulare funcțională	2	48	Schimbare MPP	Proiectant Manager / 1 zi	Verificarea schemei electronice de comandă	8	1	1	8
		Încălzirea excesivă a MPP	Nu poate fi utilizat în parametrii optimi	6	Utilizare în afara parametrilor previzionați	4	Simulare funcțională	5	120	Schimbare MPP	Proiectant Manager / 1 zi	Verificarea regimurilor de funcționare a MPP	6	2	3	36
		Defectarea rulmenților	Precizie scăzută de poziționare	7	Depășirea duratei de viață	3	Simulare funcțională	9	189	Schimbare MPP	Proiectant Manager / 1 zi	Verificarea numărului de ore de funcționare prescrise	7	2	2	28
2	Driver	Divizarea necorespunzătoare a pasului	Precizie scăzută de poziționare	7	Rezoluție mică	3	Simulare funcțională	5	105	Schimbare driver	Proiectant Manager / 1 zi	Selectarea driver-ului impus de MPP cu incrementul liniar adecvat	7	1	1	7
3	Șurub-piuliță	Contact imperfect între spine	Precizie scăzută de poziționare	7	Eroare de proiectare	4	Simulare funcțională	5	140	Verificarea calculelor	Proiectant Manager / 2 zile	Verificarea profilului șurubului și piuliței	7	2	2	28
		Joc între spine	Precizie scăzută de poziționare	7	Eroare de proiectare	4	Simulare funcțională	5	140	Verificarea calculelor	Proiectant Manager / 2 zile	Verificarea toleranțelor la profilul șurubului și piuliței	7	2	2	28
		Pas axial neadecvat	Precizie scăzută de poziționare	7	Eroare de proiectare	4	Simulare funcțională	5	140	Verificarea calculelor	Proiectant Manager / 2 zile	Verificarea calculului pasului la șurub și piuliță	7	2	2	28

Analiza modurilor de defectare și a efectelor acestora											Rezultatul acțiunilor					
Nr. crt.	Componenta	Defectare	Efectul defectului	Severitate	Cauza defectării	Apariție	Măsuri de depistare și control	Detectare	RPN	Măsuri recomandate de înlăturare	Responsabilitate / termen	Acțiuni de remediere	Severitate	Apariție	Detectare	RPN
4	Cuplaj	Incapabilitatea conectării arborelui motorului la arborele șurubului conducător	Nu poate fi utilizat	10	Alegerea greșită a cuplajului	3	Simulare funcțională	2	60	Verificarea desenului de execuție al șurubului piuliță și documentația cuplajului	Proiectant Manager / 2 zile	Compararea diametrului arborelui motorului și șurubului conducător cu diametrul de legătură al cuplajului	10	2	1	20
5	Encoder	Detectarea defectuoasă a deplasărilor	Imprecizia comenzilor de deplasare	7	Rezoluție în afara domeniului MPP	3	Simulare funcțională	5	105	Verificarea documentației motorului și a encoder-ului	Proiectant Manager / 2 zile	Alegerea encoder-ului pe baza rezoluției MPP	7	1	1	7
6	Coloană de ghidare	Rola nu ia contact cu coloana de ghidare	Dăunează preciziei	7	Reglare greșită	4	Simulare funcțională	5	140	Verificarea reglării	Proiectant Manager / 2 zile	Stabilirea poziției rolei de contact și intervalului de deplasare	7	1	2	14
		Presiunea de contact este excesivă	Imprecizia comenzilor de deplasare	7	Eroare de proiectare	4	Simulare funcțională	5	140	Verificarea reglării	Proiectant Manager / 2 zile	Stabilirea poziției rolei de contact și intervalului de deplasare a rolei	7	1	2	14
7	Lanț ultrasonic	Introduce vibrații în sistem	Dăunează preciziei	7	Identificarea greșită a canalului nodal	3	Simulare funcțională	5	105	Verificarea desenului de execuție și a simulării funcționale	Proiectant Manager / 2 zile	Verificarea amplitudinii de oscilație pe suprafața de contact a concentratorului ultrasonic	7	2	2	28

### 6.5.1. Calcularea Numărului de Eficiență Economică

Este realizată o ierarhizare suplimentară a acțiunilor / măsurilor întreprinse asupra cauzelor de producere a defectiunilor pe baza Numărului de Eficiență Economică NEE [24].

NEE este calculat cu relația:

$$NEE = RIA * CIA * IRN \quad (6.1)$$

unde:

*RIA* – Rapiditatea Implementării Acțiunii, pe o scală de la 1 la 10 (foarte rapid 10, foarte lent 1);

*CIA* – Costul Implementării Acțiunii, pe o scală de la 1 la 10 (foarte ieftin 10, foarte scump 1);

*IRN* – Impactul asupra Reducerii Numărului de risc (RPN), estimează cât de repede s-a redus numărul de risc, pe o scală de la 1 la 10 (foarte rapid 10, foarte lent 1);

Este alcătuit următorul tabel cu toate acțiunile preconizate:

**Tabelul 6.6.** Numărul de eficiență economică NEE

Nr. Crt.	Acțiunea de remediere a RPN	RIA	CIA	IRN	NEE
1	Verificarea numărului de ore de funcționare prescrise	9	9	10	810
2	Verificarea toleranțelor la profilul șurubului și piuliței	8	9	9	648
3	Compararea diametrului arborelui motorului și șurubului conducător cu diametrul de legătură al cuplajului	9	8	9	648
4	Selectarea driver-ului impus de MPP cu incrementul liniar adecvat	8	8	10	640
5	Verificarea incrementului unghiular al MPP	7	8	10	560
6	Verificarea profilului șurubului și piuliței	7	8	9	504
7	Verificarea calculului pasului la șurub și piuliță	7	8	9	504
8	Alegerea encoder-ului pe baza rezoluției MPP	7	7	10	490
9	Verificarea traseului de comandă electronic	6	7	10	420
10	Stabilirea poziției rolei de contact și intervalului de deplasare a rolei	6	8	8	384
11	Verificarea schemei electronice de comandă	5	6	10	300
12	Verificarea regimurilor de funcționare a MPP	4	6	10	240
13	Verificarea amplitudinii de oscilație pe suprafața de contact a concentratorului ultrasonic	3	3	9	81

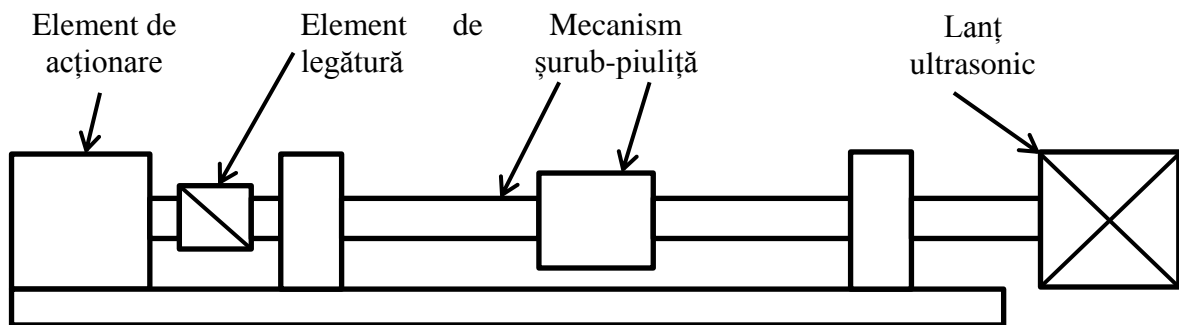
În final, se adoptă cu prioritate acele măsuri în ordinea descrescătoare a factorului NEE.



## Capitolul 7. Proiectarea detaliată a sistemului de avans pentru microelectroeroziune asistată de ultrasunete

Structura sistemului de avans rezultată din procesul de proiectare conceptuală este prezentată în **Figura 7.1**:

1. Mecanismul șurub-piuliță – transformă mișcarea de rotație în mișcare de translație, precizia fiind influențată de tipul mecanismului;
2. Elementele de acționare – responsabile de acționarea și comanda sistemului de avans;
3. Lanțul ultrasonic – duce la îmbunătățirea stabilității și performanței procesului de microelectroeroziune;
4. Elementele de legătură – realizează conexiunea dintre elemente și asigură transmiterea mișcărilor.



**Figura 7.1** Structura sistemului de avans pentru microEDM+US

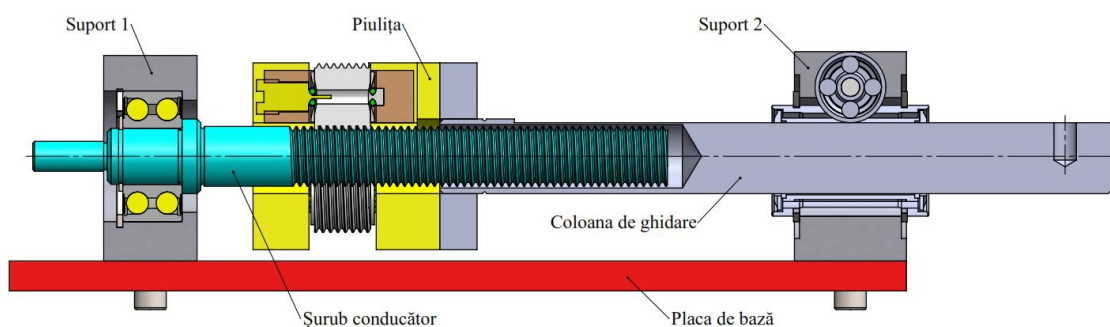
Din capitolul anterior s-a ales ca element de acționare motorul electric pas cu pas, ca element executant mecanismul șurub-piuliță cu role, și cuplaje elastice ca elemente de legătură.

### 7.1. Mecanismul șurub-piuliță

Mecanismele tip șurub-piuliță sunt utilizate pentru transformarea mișcării de rotație în mișcare de translație, cu transmiterea unor sarcini mari (transmisii de forță) sau având doar rol cinematic (transmisii de mișcare) [19].

#### 7.1.1. Dimensionarea zonelor-cheie

În această etapă, sunt aleși rulmenții pentru reducerea frecării dintre șurubul conducător și suportul fix 1, și dintre piuliță și suportul fix 2 și implicit, pentru reducerea timpului de răspuns al sistemului de avans în procesul de prelucrare microEDM+US. Sistemul de avans are două puncte de sprijin, unul care permite rotația șurubului conducător, montat în primul suport, și unul montat în al doilea suport care permite translația piuliței (**Figura 7.2**).



**Figura 7.2** Sistemul de avans și cele două suporturi fixe ale șurubului conducător

## 1) Rulment pentru șurubul conducător

După alegerea tipului de rulment, se utilizează [26] pentru alegerea rulmentului specific în funcție de capacitatea de încărcare admisibilă necesară ( $C_{0a\ req}$ ). Este selectat rulmentul cu codul 3202 A-2RS1TN9/MT33 [27], ale cărui caracteristici sunt prezentate în **Tabelul 7.1**:

**Tabelul 7.1** Date rulment 3202 A-2RS1TN9/MT33 [26]

Diametrul interior $d$ [mm]	Diametrul exterior $D$ [mm]	Lățimea $B$ [mm]	Capacitatea de încărcare dinamică $C_a$ [N]	Capacitatea de încărcare statică $C_{0a}$ [N]
15	35	15.9	11200	6800

După cum se poate vedea din tabel,  $C_{0a\ req} = 1466\ N < C_{0a} = 6800\ N$ , astfel rulmentul satisface condițiile necesare pentru a putea fi utilizat în cadrul mecanismului șurub-piuliță.

Se alege din tabelul “*seat tolerances for standard conditions*” ajustajul pentru diametrul arborelui  $\varnothing 15\ j5$  ( $^{+0.005}_{-0.003}$ ), recomandat pentru aplicațiile unde direcția încărcării este nedeterminată iar inelul interior execută o mișcare de rotație și ajustajul pentru cămașă  $\varnothing 35\ H7$  ( $^{+0.025}_0$ ), recomandat pentru diverse încărcări unde inelul exterior este staționar [27].

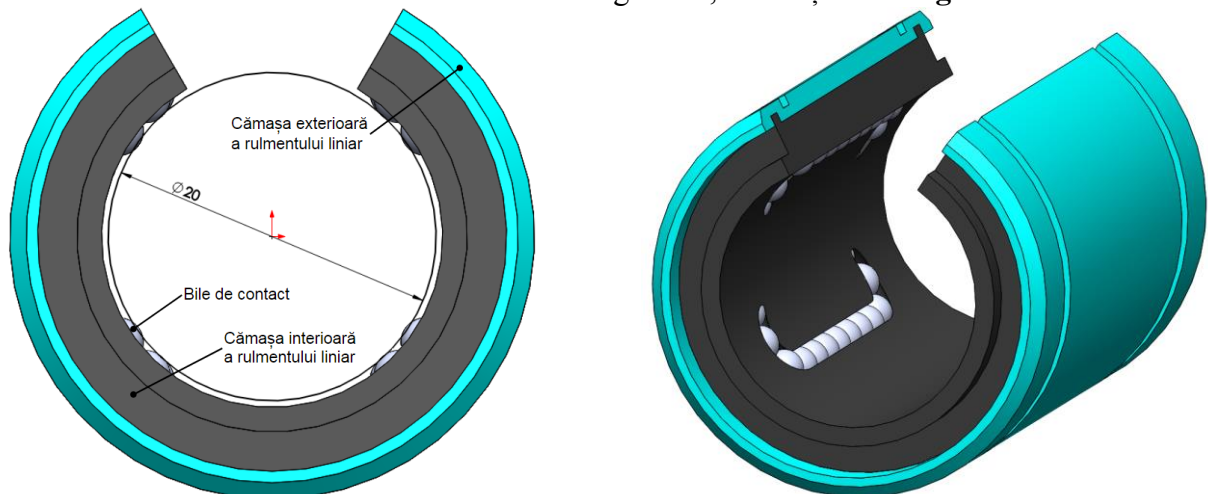
## 2) Rulment liniar pentru piuliță

Piulița execută o mișcare de translație, astfel că este necesar un rulment liniar / bușă cu bile, care ghidează coloana de ghidare care execută o mișcare de translație cu frecare minimă. Se preselecționează un rulment liniar LME-20-UU-OP [28] și se calculează sarcina statică. Acest tip de rulment prezintă o zonă liberă care corespunde unei suprafețe plane practicate pe coloana de ghidare, care va fi utilizată pentru a bloca mișcarea de rotație a piuliței, astfel încât aceasta să execute doar o mișcare de translație. Se recomandă pentru cămașă diametrul  $\varnothing 32\ P7$  ( $^{-0.017}_{-0.042}$ ) și astfel se formează un ajustaj cu strângere cu rulmentul liniar. Datele rulmentului sunt prezentate în **Tabelul 7.2**:

**Tabelul 7.2** Date rulment liniar LME-20-UU-OP [28]

Diametrul interior $d$ [mm]	Abateri diametru interior [mm]	Diametrul exterior $D$ [mm]	Abateri diametru exterior [mm]	Lățimea $B$ [mm]	Capacitatea de încărcare dinamică $C_a$ [N]	Capacitatea de încărcare statică $C_{0a}$ [N]
20	$20^{+0.009}_{-0.001}$	32	$32^0_{-0.011}$	45	863	1370

În cămașa interioară a rulmentului liniar există patru canale cu bile recirculante, fiecare canal are 10 bile care sunt în contact cu coloana de ghidare, evidențiate în **Figura 7.3**.

**Figura 7.3** Modelul 3D al rulmentului liniar LME-20-UU-OP, conform datelor din [28]

Sarcina statică ( $C_{0n}$ ) este calculată cu relația [28]:

$$C_{0n} = S_s * q * F_a [N] \quad (7.1)$$

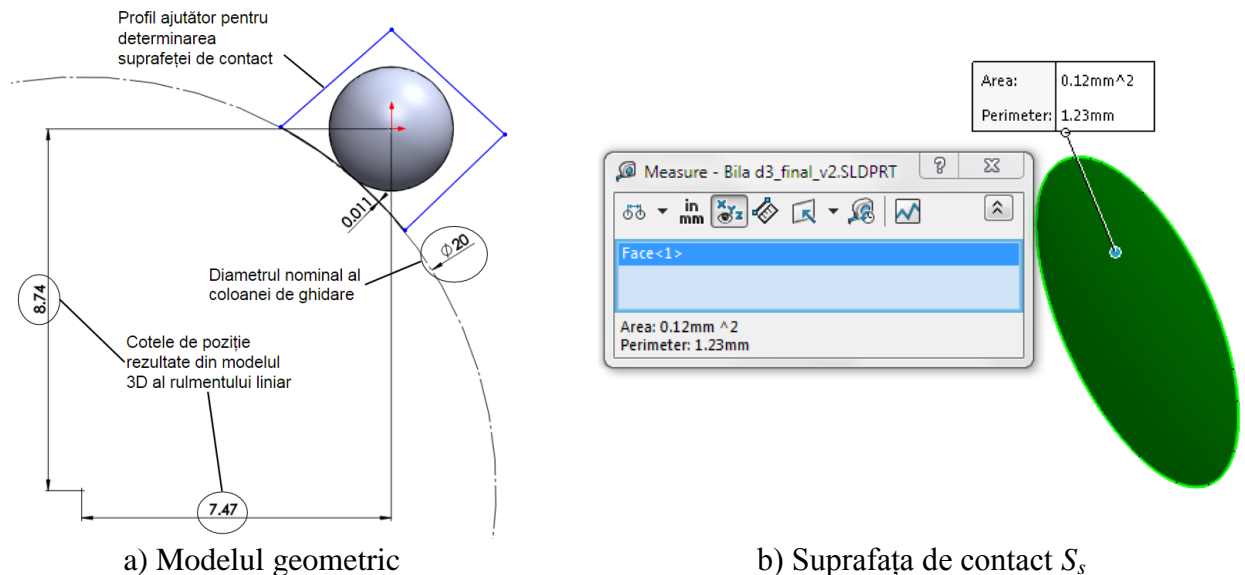
unde:  $S_s$  – suprafața de contact a unei bile [mm<sup>2</sup>];  $d_c$  – diametrul coloanei de ghidare [mm];  
 $q$  – numărul de bile din rulmentul linear [bile];  $q = 40$  bile;  $F_a$  – încărcarea axială;  
 $F_a = 10$  N.

Pentru calculul suprafeței de contact este calculată diferența dintre diametrul coloanei de ghidare ( $d_c = 20^{+0.020}_{+0.012}$  mm) și diametrul interior al rulmentului ( $d = 20^{+0.009}_{-0.001}$  mm) în cele patru cazuri relevante evidențiate în **Tabelul 7.3**.

Este calculată diferența între diametre ( $d_{dif}$ ) cu formula:

$$d_{dif} = d - d_c [mm] \quad (7.2)$$

Ulterior,  $d_{dif}$  este utilizat în modelul 3D (**Figura 7.4**) pentru a determina suprafața de contact ( $S_s$ ) dintre coloana de ghidare și bila rulmentului linear utilizând comanda “Measure” din Solidworks.



**Figura 7.4** Determinarea suprafeței de contact a bilei cu arborele coloanei de ghidare pentru cazul I  
Valorile sarcinii statice ( $C_{0n}$ ) pentru cele patru cazuri posibile sunt prezentate în **Tabelul 7.3**.

**Tabelul 7.3** Cazuri posibile

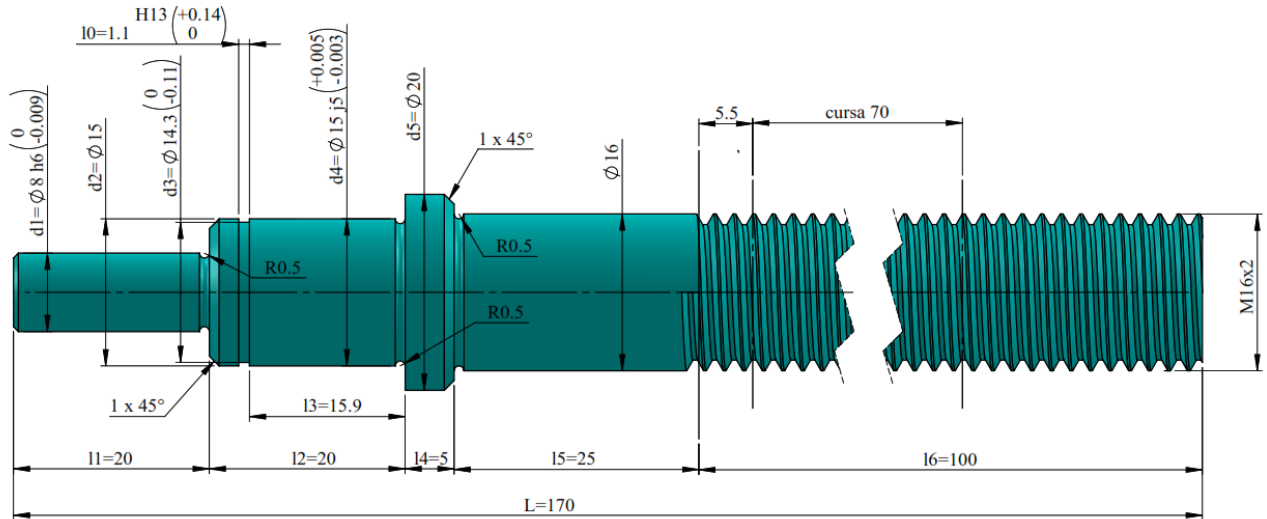
Cazul I		Cazul II	
$d_c = 20.02$ mm	$d = 20.009$ mm	$d_c = 20.02$ mm	$d = 19.999$ mm
$d_{dif1} = 20.02 - 20.009 = 0.011$ mm		$d_{dif2} = 20.02 - 19.999 = 0.021$ mm	
$S_{s1} = 0.12$ mm <sup>2</sup>		$S_{s2} = 0.21$ mm <sup>2</sup>	
$C_{0n1} = 0.12 * 40 * 10 = 48$ N		$C_{0n1} = 0.21 * 40 * 10 = 84$ N	
Cazul III		Cazul IV	
$d_c = 20.012$ mm	$d = 20.009$ mm	$d_c = 20.012$ mm	$d = 19.999$ mm
$d_{dif3} = 20.012 - 20.009 = 0.003$ mm		$d_{dif4} = 20.012 - 19.999 = 0.013$ mm	
$S_{s3} = 0.05$ mm <sup>2</sup>		$S_{s4} = 0.14$ mm <sup>2</sup>	
$C_{0n3} = 0.05 * 40 * 10 = 20$ N		$C_{0n4} = 0.14 * 40 * 10 = 56$ N	

Rulmentul linear are o sarcină statică admisibilă (sarcina maximă pe care un rulment o poate suporta înainte de apariția unor defecte permanente; indică o sarcină static aplicată într-o direcție constantă)  $C_{0a} = 1370$  N, care este mai mare decât cele calculate în tabel, prin urmare, rulmentul este adecvat pentru a fi utilizat în cadrul mecanismului șurub-piuliță.

După această pre dimensionare inițială, bazată pe alegerea celor doi rulmenți urmează proiectarea șurubului conducător propriu-zis.

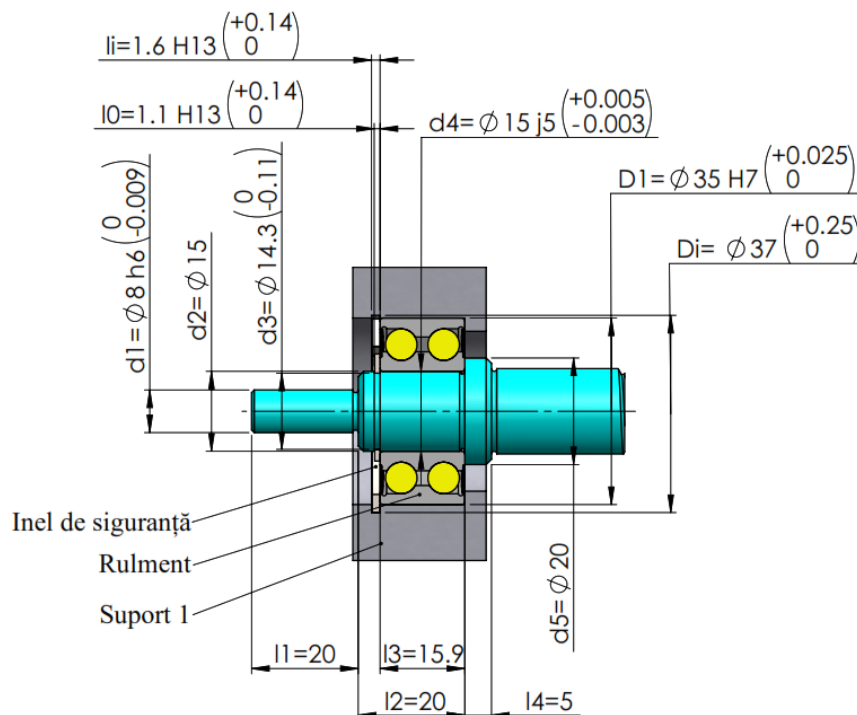
## 7.2. Proiectarea șurubului conducător

Este proiectat constructiv șurubul conducător, ținând cont de dimensionarea zonelor cheie, evidențiate în etapa anterioară. Șurubul conducător dimensionat este prezentat în **Figura 7.5**:



**Figura 7.5** Șurub conducător

Se începe cu partea din stânga (**Figura 7.5**), cu diametrul  $d_1 = \text{Ø}8 \text{ h}6 \left( \begin{smallmatrix} 0 \\ -0.009 \end{smallmatrix} \right)$ , necesar pentru conectarea arborelui motorului cu șurubul conducător prin intermediul unui cuplaj. Lungimea de prindere în cuplaj este de  $l_1 = 20 \text{ mm}$ . Urmează apoi  $d_2 = \text{Ø}15$  care prezintă un locaș cu lungimea canalului de  $l_0 = 1.1 \text{ H}13 \left( \begin{smallmatrix} +0.14 \\ 0 \end{smallmatrix} \right)$ , și  $d_3 = 14.3 \left( \begin{smallmatrix} 0 \\ -0.11 \end{smallmatrix} \right)$ , conform DIN 471 pentru un inel de siguranță, utilizat pentru fixarea rulmentului prezentat în **Figura 7.6**. Degajările între suprafețele cu diametre diferite au forma unor canale semicirculare cu R0.5 mm.



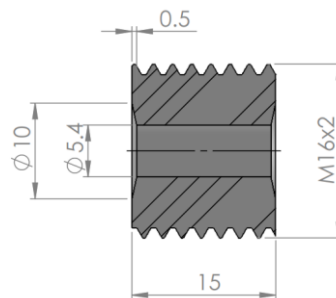
**Figura 7.6** Detaliu asamblare rulment

Pe lungimea  $l_3 = 15.9$  se montează rulmentul cu contact unghiular cu două rânduri de bile 3202 A-2RS1TN9/MT33 [27], diametrul arborelui este recomandat să fie  $d_4 = \varnothing 15 j5 \begin{smallmatrix} +0.005 \\ -0.003 \end{smallmatrix}$  pentru a bloca inelul interior al rulmentului de arbore. Diametrul interior al suportului, unde este montat rulmentul, este recomandat să fie  $D_1 = \varnothing 35 H7 \begin{smallmatrix} +0.025 \\ 0 \end{smallmatrix}$ . Suportul este prevăzut cu un locaș pentru un inel de siguranță pentru fixarea inelului exterior al rulmentului, cu dimensiunile recomandate de DIN 472,  $D_i = \varnothing 37 \begin{smallmatrix} +0.25 \\ 0 \end{smallmatrix}$  și  $l_i = 1.6 H13 \begin{smallmatrix} +0.14 \\ 0 \end{smallmatrix}$ .

Urmează umărul pe care este fixat rulmentul, acesta este recomandat să fie mai mare de  $\varnothing 16$  [27], condiție pe care  $d_5 = \varnothing 20$  o îndeplinește. Lungimea  $l_4 = 5$  fiind selectată constructiv. Urmează zona definită de  $l_5$  și diametrul  $\varnothing 16$ , a cărei lungime este recomandată de SKF [25] să fie **mai mare de 12 mm**. Valoarea  $l_5$ , (v. **Figura 7.5**) îndeplinește condiția. În partea dreaptă, urmează filetul **M16x2** care are o lungime de  $l_6 = 100$  și o cursă de lucru stabilită constructiv de **70 mm**, evidențiată în **Figura 7.5**. Porțiunea de 70 mm este domeniul limită în care rolele se pot deplasa. Teșiturile necotate sunt  $1x45^\circ$ .

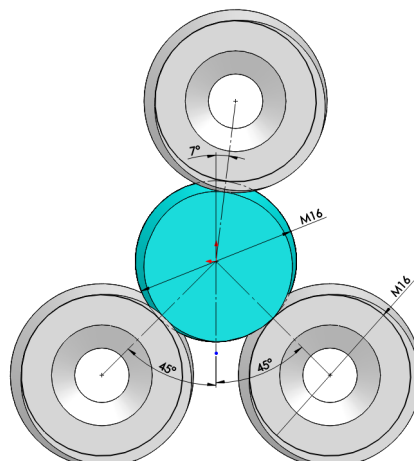
### 7.3. Proiectarea rolei și piuliței

În această etapă, se realizează proiectarea constructivă a rolei și a piuliței. Șurubul conducător intră în contact cu un anumit număr de role. Astfel, se începe cu proiectarea unei role, știind că șurubul conducător are un diametru de M16 cu pasul de 2 mm. În **Figura 7.7** se prezintă rola proiectată având lungimea de 15 mm.



**Figura 7.7** Rolă

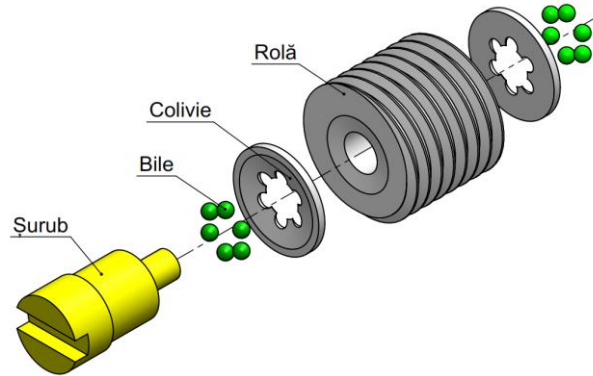
Rolele sunt poziționate în jurul șurubului conducător luând contact cu acesta, urmărind reducerea timpului de răspuns – cerință a procesului de prelucrare microEDM+US. Sunt dispuse două role la  $45^\circ$  care vor fi montate primele. Cea de-a treia rolă este dispusă la  $7^\circ$ , rolul ei este de a menține toate rolele în contact cu șurubul conducător și de a exercita o forță de apăsare prin efectul de pârghie, respectiv presiune de contact, astfel încât să se obțină precizia de poziționare a sistemului de avans (**Figura 7.8**).



**Figura 7.8** Dispunerea rolor pe șurubul conducător

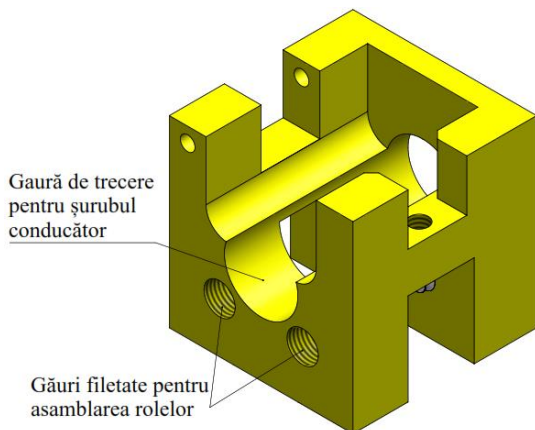


Pentru a putea asambla rolele în subansamblul (corpul) piuliței, fiecărei role i se adaugă două colivii pentru menținerea bilelor, două seturi de șase bile pentru a permite rotația în jurul axei rolei cu frecare minimă și un șurub pentru asamblarea în corpul piuliței (conform **Figura 7.9**). Fiecare rolă are o gaură de trecere pentru șurubul M10 și o teșitură definită de cotele din **Figura 7.7**, necesare pentru montarea coliviilor bilelor.

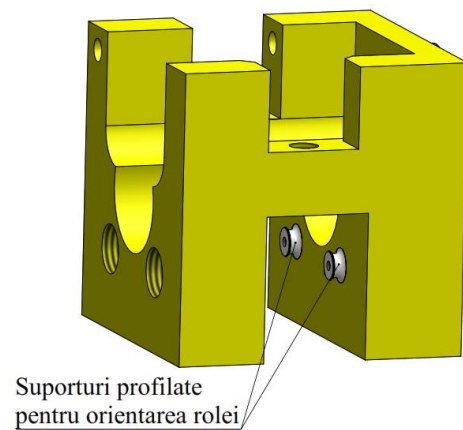


**Figura 7.9** Subansamblul rolă

Subansamblul rolă din **Figura 7.9** se montează în corpul piuliței din **Figura 7.10**. Fixarea a două role în corpul piuliței este realizată prin intermediul găurilor filetate M10 evidențiate în **Figura 7.10**, urmând ca orientarea rolilor să se realizeze prin suportul profilat (canalul circular are forma conjugată a bilelor) asamblat cu strângere ( $H7/p6$ ) în corpul piuliței din **Figura 7.11**.

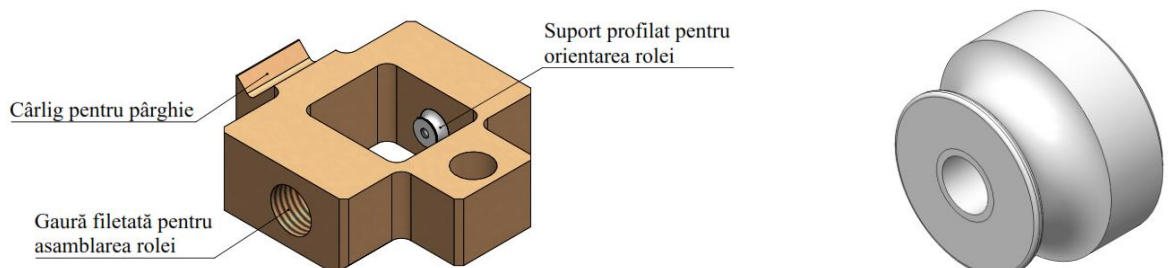


**Figura 7.10** Evidențierea găurilor de fixare pentru role pe corpul piuliței



**Figura 7.11** Evidențierea suportului pentru orientarea rolilor pe corpul piuliței

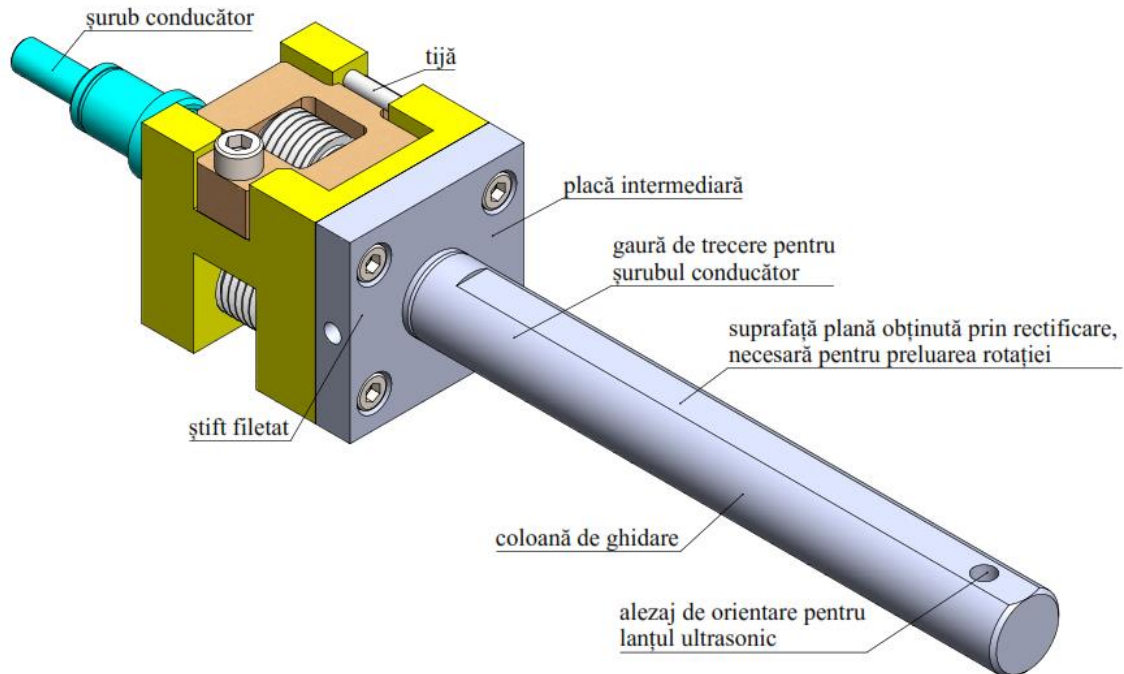
Pentru asamblarea celei de-a treia role, este necesar un suport care permite montarea și demontarea acesteia pe șurubul conducător (**Figura 7.12**). Montarea rolei în suport se va realiza similar cu montarea celor din corpul piuliței. Acest suport permite utilizarea unei pârgăii cu ajutorul unui cârlig, ceea ce asigură o forță mai mare pentru aducerea în contact a tuturor rolilor cu șurubul conducător și implicit, precizia de poziționare a sistemului de avans. Acest mod de asamblare este evidențiat în **Figura 7.12**.



**Figura 7.12** Suportul pentru cea de-a treia rolă (stânga) și suportul profilat (dreapta)



Piulița nu trebuie să execute o mișcare de rotație (la EDM, se realizează suprafețe care nu sunt de revoluție), astfel că pe aceasta se assemblează prin filetare cu o placă intermediară cu o coloană de ghidare cu o suprafață plană longitudinală (**Figura 7.13**) care în combinație cu rulmentul (rola) din suportul 2 (**Figura 7.14**) va prelua mișcarea de rotație. De asemenea, arborele este prevăzut cu un alezaj de prindere, utilizată pentru montarea lanțului ultrasonic.

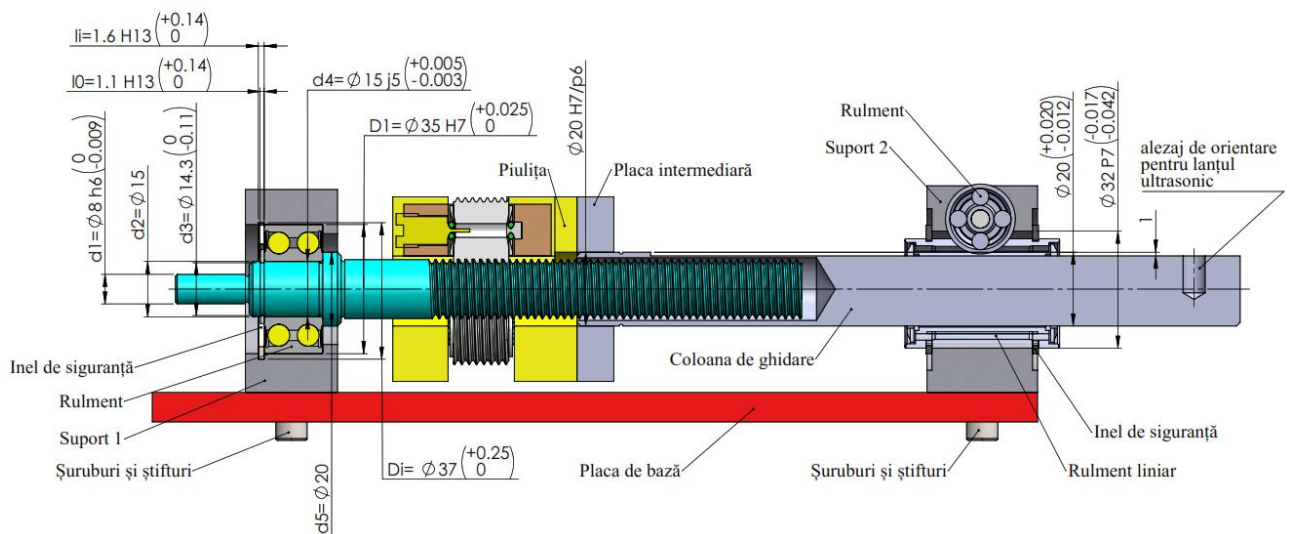


**Figura 7.13** Asamblarea unei coloane de ghidare pe corpul piuliței

Urmează proiectarea tuturor celorlalte elemente care formează ansamblul șurub-piuliță cu role.

#### 7.4. Proiectarea elementelor conexe

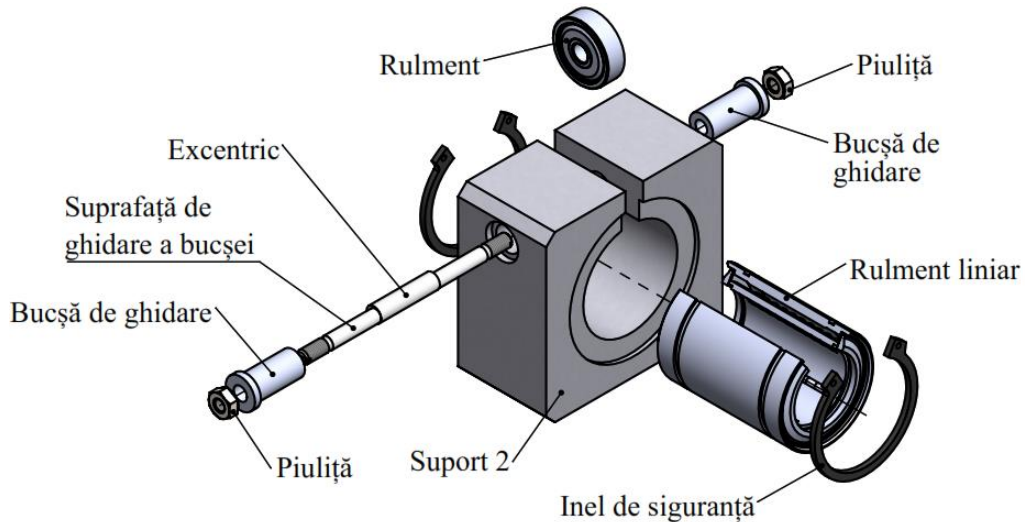
În această etapă sunt proiectate, restul elementelor de susținere a sistemului șurub-piuliță. În **Figura 7.14**, se prezintă sistemul de avans proiectat (nu conține MPP, encoder-ul și lanțul US):



**Figura 7.14** Sistemul de avans șurub-piuliță

În partea stângă (**Figura 7.14**) se află suportul 1, care prezintă principala suprafață de susținere a șurubului conducător. Acesta are montat în interior un rulment cu scopul reducerii frecării cu influență asupra timpului de răspuns la comenzile de avans și retragere ale sistemului de

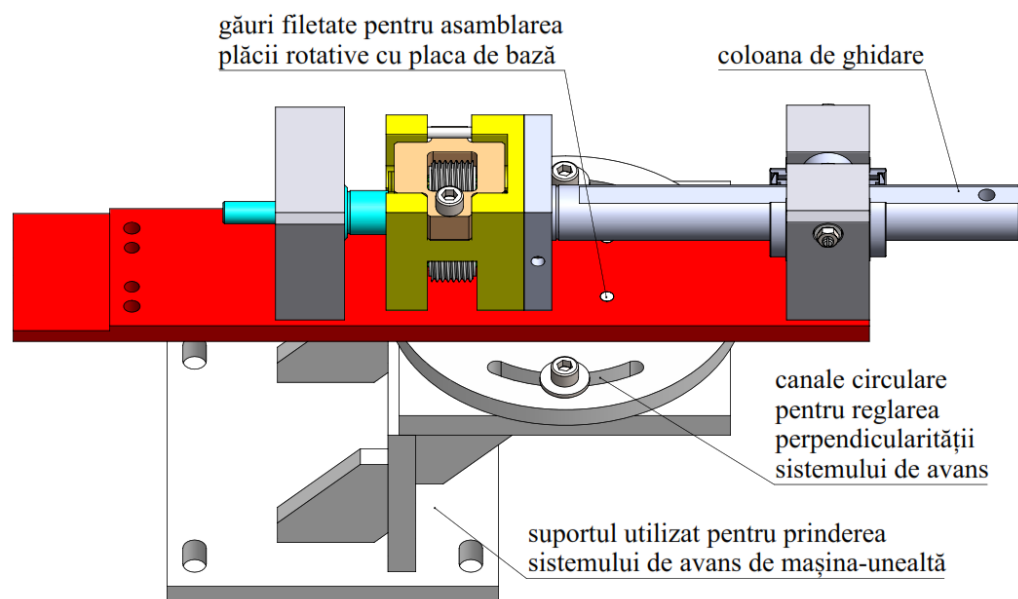
avans. Pe corpul piuliței, este asamblată coloana de ghidare cu ajutorul plăcii intermediare care are rolul de a preveni mișcarea de rotație a piuliței, respectiv a transforma mișcarea de rotație a șurubului conducător în mișcare de translație. Pe coloana de ghidare este realizat un alezaj de orientare, care va fi utilizat pentru asamblarea lanțului ultrasonic și o suprafață plană de adâncime 1 mm față de circumferința coloanei pentru preluarea rotației prin contact cu rulmentul din suportul 2 (**Figura 7.15**).



**Figura 7.15** Detaliu suport 2

Acest rulment este montat pe un excentric și introdus în suportul 2. Apoi sunt introduse două bucșe de ghidare, ce iau contact cu suprafața din **Figura 7.15**. La rotirea excentricului, rulmentul se apropie sau se îndepărtează de suprafața plană longitudinală a coloanei de ghidare. Suportul 1 și suportul 2 sunt fixate și orientate pe o placă de bază prin intermediul șuruburilor și știfturilor (**Figura 7.14**).

În aceeași etapă este proiectată și placa rotativă care permite reglarea perpendicularității sistemului de avans (**Figura 7.16**). Aceasta are două canale circulare, fixarea la unghi fiind asigurată prin intermediul a două șuruburi cu șaibe. Placa rotativă este asamblată cu placa de bază și cu suportul utilizat pentru prinderea sistemului de avans de mașina-unealtă.



**Figura 7.16** Sistemul de avans cu placa rotativă pentru reglarea perpendicularității

Reglarea perpendicularității se realizează în urma palpării coloanei de ghidare cu un comparator la deplasarea axială a acesteia prin comanda MPP.

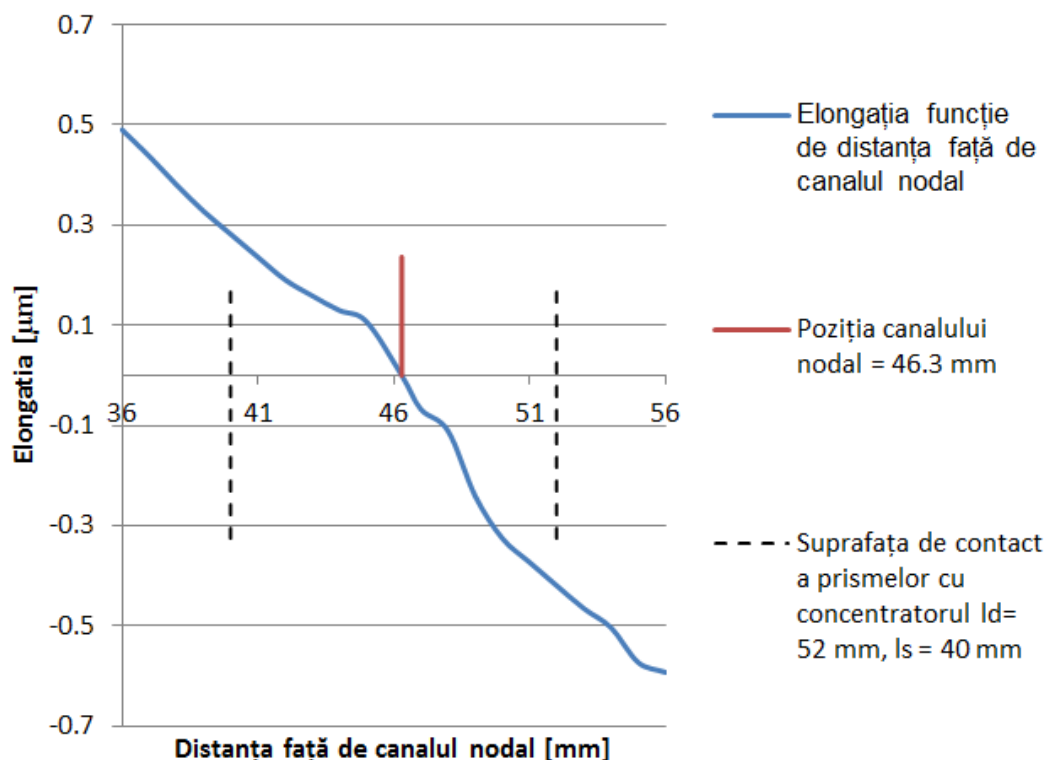
## 7.5. Proiectarea sistemului de prindere a lanțului ultrasonic

Lanțul ultrasonic este orientat și fixat prin intermediul a două prisme [29], al cărui contact se realizează în zona canalului nodal de pe concentrator. Contactul minim cu concentratorul pe o lungime de 12 mm a fost impus ca o condiție pentru prevenirea transmiterii vibrațiilor în tot sistemul. Contactul prismelor cu concentratorul se face simetric față de canalul nodal (punct în care amplitudinea este nulă).

Este de menționat că prismele sunt proiectate după modelarea și realizarea fizică a concentratorului.

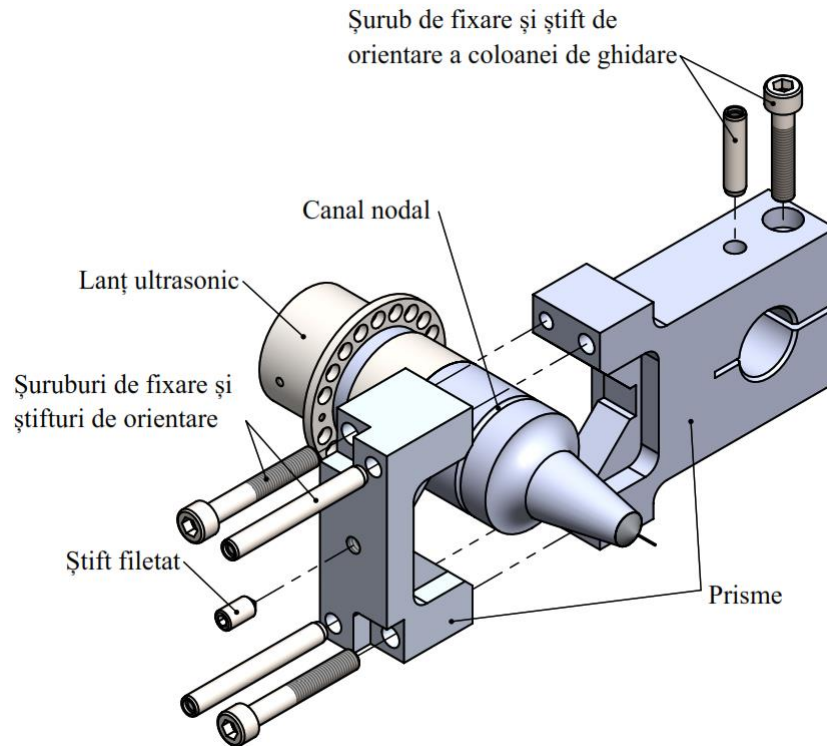
În **Figura 7.17**, se prezintă elongația în funcție de distanța față de canalul nodal. Distanța canalului este cotată din vârful concentratorului. Datele pentru realizarea **Figura 7.17** sunt extrase din modelul Comsol al concentratorului final (**Figura 8.3**). Datele extrase din Comsol reprezintă amplificarea  $K$ , pentru obținerea elongației, această amplificare  $K$  este înmulțită cu o anumită amplitudine (în cazul de față  $A = 1 \mu\text{m}$ ).

Din **Figura 7.17**, reiese că amplitudinea nulă (punctul nodal) este la o distanță de **46.3 mm** de suprafața frontală a concentratorului, astfel că pe o distanță simetrică de 6 mm se va realiza contactul cu cele două prisme. Suprafața de contact a prismelor cu concentratorul fiind realizată în intervalul dimensional 40 – 52 mm, măsurat de la suprafața frontală a concentratorului.



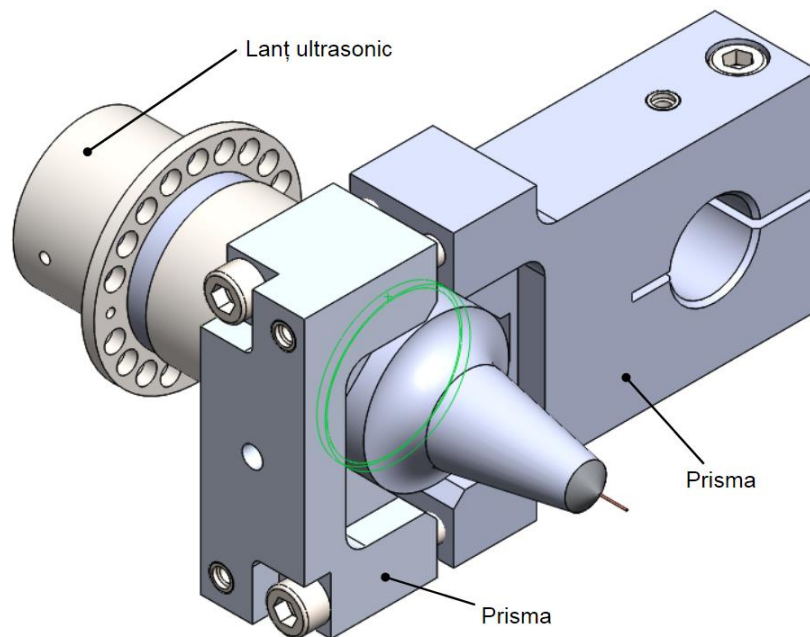
**Figura 7.17** Variația elongației față de distanța de canalul nodal

Pentru a ajuta centrarea canalului nodal pe mijlocul prismelor, se introduce un știft filetat conic (**Figura 7.18**) într-una din prisme.



**Figura 7.18** Asamblarea concentratorului cu prismele și cu arborele piuliței

Conul știftului va centra canalul nodal al concentratorului pe mijlocul prismelor, urmând să fie strânse șuruburile de prindere, astfel asigurându-se orientarea și fixarea concentratorului ultrasonic cu ajutorul prismelor. Prismele sunt realizate din AlZnMgCu15 (aliaj de aluminiu) pentru a solicita cât mai puțin sistemul de avans. Masa totală a ansamblului din **Figura 7.19** este de **0.949 kg** care corespunde unei încărcări axiale de aproximativ  $F_a = 10 N$ , condiția fiind ca masa ansamblului să nu depășească 1 kg (v. subcapitolul 7.1.1).



**Figura 7.19** Asamblarea concentratorului de-a lungul canalului nodal (verde) cu lanțul ultrasonic

Prismele sunt orientate și fixate una față de cealaltă prin intermediul a două șuruburi M6 și a două știfturi  $\varnothing 6 h6$ . Se utilizează un știft de orientare  $\varnothing 6 h6$  și un șurub M6 care orientează și fixează lanțul ultrasonic pe coloana de ghidare prin strângere cu un alezaj elastic (**Figura 7.18**).

## Capitolul 8. Modelarea și simularea funcționării sistemului de avans pentru microelectroeroziune asistată de ultrasunete

### 8.1. Modelarea și simularea funcționării concentratorului ultrasonic

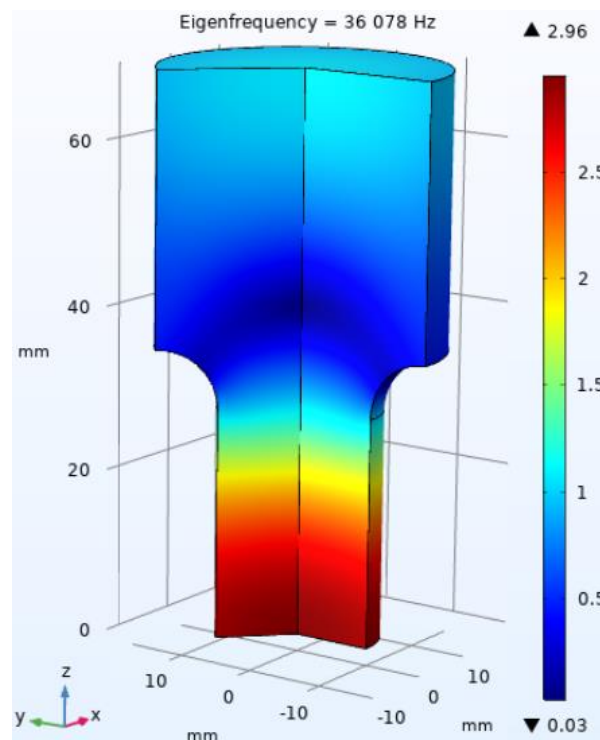
Este utilizat programul Comsol Multiphysics cu modulul Structural Mechanics și studiul Eigenfrequency pentru a modela concentratorul ultrasonic proiectat în capitolul 7.5 [39]. Materialul utilizat este oțel AISI 4340 pentru concentrator și cupru 99.5 pentru electrodul-sculă filiform. Geometria concentratorului ultrasonic este realizată în spațiul 2D axysimetric, utilizând parametrii din **Tabelul 8.1**, lungimile și razele concentratorului au fost preluate din capitolul 7.5, unde a fost proiectat concentratorul inițial, cilindric în trepte.

**Tabelul 8.1** Parametrii concentratorului în stadiul inițial

Parametru	Expresie	Valoare	Descriere
l1	33.372 [mm]	0.033372 m	lungime treaptă superioară
r1	17.5 [mm]	0.0175 m	rază treaptă superioară
l2	35.596 [mm]	0.035596 m	lungime treaptă superioară
r2	10 [mm]	0.01 m	rază treaptă superioară
rr	r1-r2	0.0075 m	rază de racordare la trepte
modulE	2.1E11	2.1E11	modulul Young AISI 4340

**Figura 8.1** prezintă frecvența proprie a concentratorului  $f_{cr} = 36078 \text{ Hz}$  și amplificarea  $K = 2.96$ , valoarea maximă a raportului dintre elongația în secțiunea de intrare (considerată  $K=1$ ) și ieșire a concentratorului.

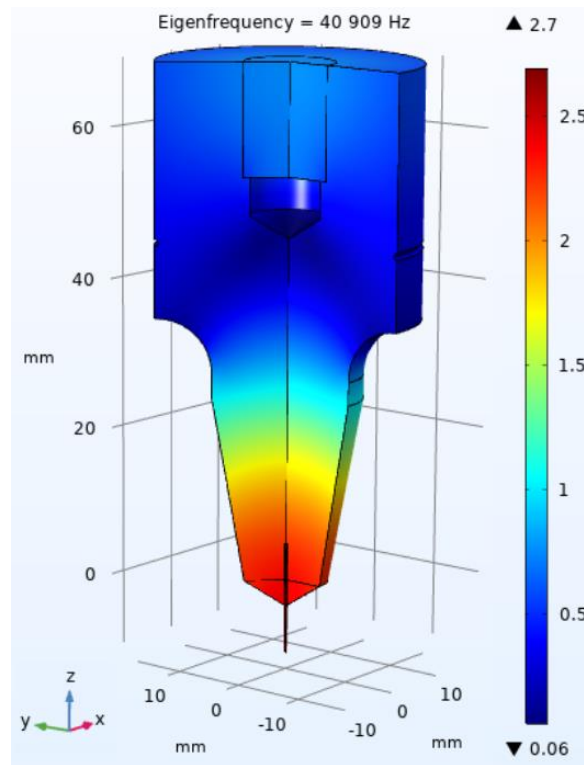
Pentru a atinge frecvența țintă de 40805 Hz, de la frecvența inițială de 36078 Hz, concentratorul va trece printr-o serie de stadii de ajustare, care presupun modificarea geometriei și implicit frecvența și coeficientul de amplificare.



**Figura 8.1** Frecvența proprie și amplificarea în stadiul inițial al concentratorului

În **Figura 8.2** se prezintă concentratorul cu canalul nodal. Cu o frecvență proprie de 40909 Hz și un coeficient de amplificare de 2.7.





**Figura 8.2** Frecvența proprie și amplificarea din stadiul 5 al concentratorului

### 8.1.1. Ajustarea concentratorului pentru atingerea frecvenței țintă

Deoarece frecvența proprie din stadiul 5 al concentratorului,  $f_{cr} = 40909 \text{ Hz}$ , este mai mare decât frecvența țintă,  $f_{tr} = 40805 \text{ Hz}$ , sunt necesare calibrări ale concentratorului prin modificarea cotelor  $l_1$  și  $l_2$ . Creșterea cotelor  $l_1$  și  $l_2$  duce la scăderea frecvenței proprii a concentratorului și reciproc.

În **Tabelul 8.2** sunt ilustrate modificările realizate pentru a ajunge la frecvența țintă.

**Tabelul 8.2** Variația frecvenței proprii a concentratorului în funcție de lungime

Lungime treaptă superioară $l_1$ [mm]	Lungime treaptă inferioară $l_2$ [mm]	Frecvență concentrator $f_{cr}$ [Hz]
33.372	35.596	40909
33.472	35.696	40803
33.572	35.796	40698
33.672	35.896	40593
33.676	35.9	40589
33.776	36	40485
33.5	36	40557
33.6	36	40531
33.7	36	40505

Se observă că frecvența țintă se atinge pentru valorile  $l_1 = 35.696 \text{ mm}$  și  $l_2 = 33.472 \text{ mm}$  (marcate cu verde). Dar, concentratorul a fost modelat virtual, prin urmare aceste valori nu pot fi adoptate efectiv pentru că nu permit ajustarea lungimilor după prelucrarea fizică.

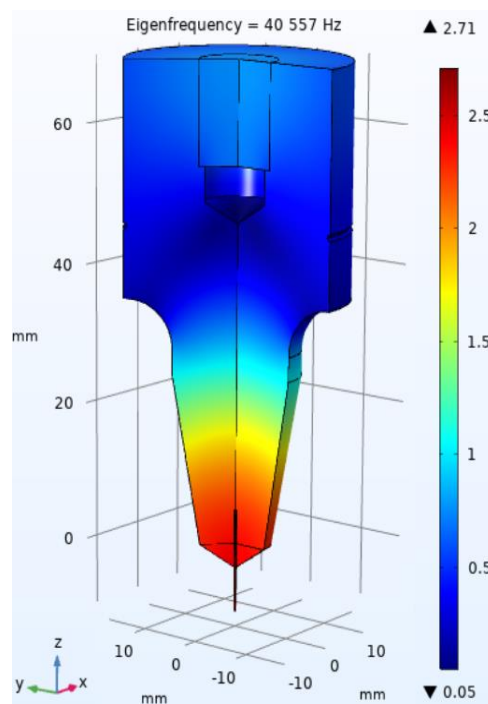
Din acest motiv, se aleg valorile  $l_1 = 36 \text{ mm}$  și  $l_2 = 33.5 \text{ mm}$  (marcate cu portocaliu), care asigură o frecvență proprie de 40557 Hz, și permit reglarea prin prelucrare (din  $l_1$ ) până la frecvența țintă de 40805 Hz. Datorită schimbării lungimilor, canalul nodal a fost re poziționat la distanța de

46.3 mm, fără a altera frecvența proprie. Parametrii concentratorului final sunt prezentați în **Tabelul 8.3**.

**Tabelul 8.3** Parametrii concentratorului în stadiul 6 (final)

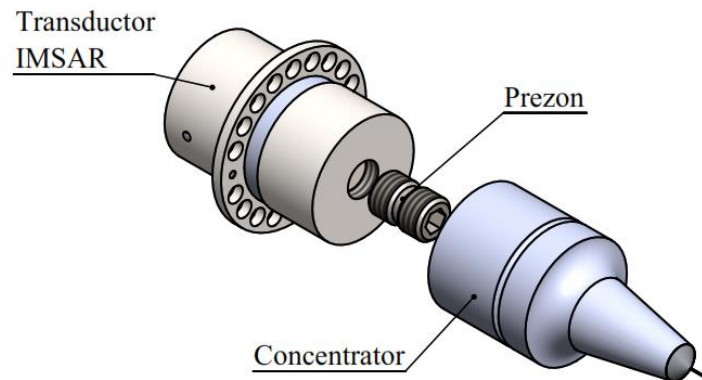
Parametru	Expresie	Valoare	Descriere
l1	36 [mm]	0.036 m	lungime treaptă superioară
r1	17.5 [mm]	0.0175 m	rază treaptă superioară
l2	33.5 [mm]	0.0335 m	lungime treaptă superioară
r2	10 [mm]	0.01 m	rază treaptă superioară
rr	r1-r2	0.0075 m	rază de racordare la trepte
modulE	2.1E11	2.1E11	modul Young AISI 4340
alfa	1 [°]	1°	grad de înclinare
rgaurasc	0.2 [mm]	2E-4 m	rază gaură locaș sculă
hgaurasc	5 [mm]	0.005 m	adâncime gaură locaș
lscula	15 [mm]	0.015 m	lungime electrod
modulECu	130 [GPa]	1.3E11 Pa	modul Young Cu
hlipire	3.5 [mm]	0.0035 m	înălțimea cordonului de sudură cu argint
modulEAg	69 [GPa]	6.9E10 Pa	modul Young Ag
rgaura	5.1 [mm]	0.0051 m	rază gaură
hgaura	20 [mm]	0.02 m	adâncime gaură
rfilet	6 [mm]	0.006 m	rază filet
hfilet	15 [mm]	0.015 m	adâncime filet
beta	59 [°]	59°	înclinare vârf
rcanal	0.5 [mm]	0.005 m	rază canal nodal
zcanal	46.3 [mm]	0.0463	coordonata z a canalului

**Figura 8.3** ilustrează modelul concentratorului final cu o frecvență proprie  $f_{cr} = 40557$  Hz și un coeficient de amplificare  $K = 4.62$ . Pentru atingerea țintei de  $f_{tr} = 40805$  Hz, concentratorul va fi testat și prelucrat succesiv. Modelul este apoi importat în Solidworks și introdus în ansamblul sistemului de avans. Masa concentratorului este de 0.304 kg.



**Figura 8.3** Frecvența proprie și amplificarea din stadiul 6 (final) al concentratorului

Pentru asamblarea concentratorului cu transductorul IMSAR se utilizează un prezon M12 (Figura 8.4) de lungime 18 mm, având același material ca și concentratorul – oțel AISI 4340. Masa prezonului este de 0.012 kg.



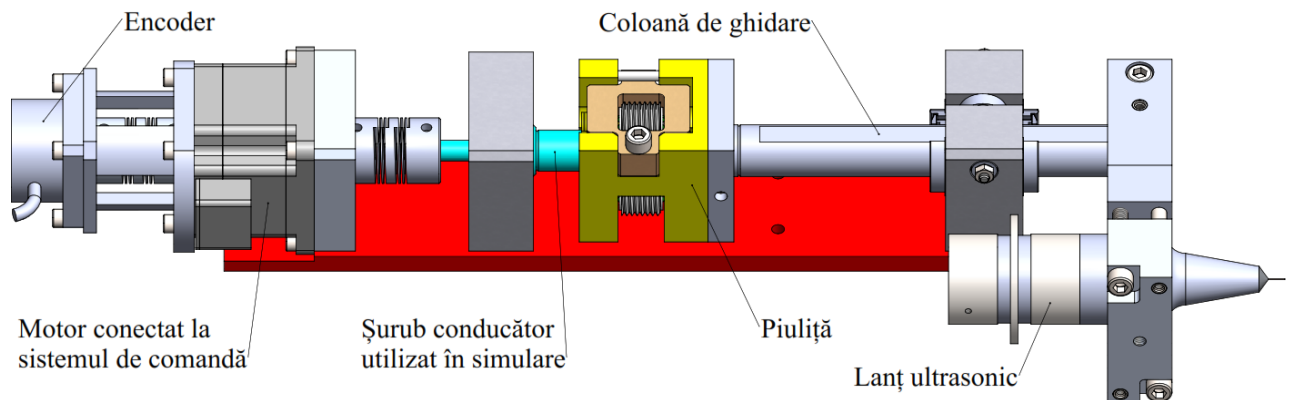
**Figura 8.4** Asamblarea transductorului cu concentratorul prin intermediul unui prezon

## 8.2. Simularea numerică privind frecvența proprie a sistemului de avans

Frecvențele naturale sau frecvențele proprii sunt anumite frecvențe discrete la care o piesă sau un sistem este predispus la vibrații. Dacă un sistem este acționat de o forță periodică exterioară, a cărei frecvență este egală sau apropiată de una dintre frecvențele naturale ale sistemului sau componente ale acestuia, acesta începe să producă vibrații cu amplitudini relativ mari. Această egalitate a frecvențelor poartă denumirea de rezonanță [32].

Electrodul-sculă este asistat ultrasonic, vibrând cu o amplitudine între 1 – 2  $\mu\text{m}$ , astfel că orice vibrație suplimentară indusă prin rezonanță afectează stabilitatea procesului [33].

În aceste condiții, a fost efectuat un studiu pentru a observa dacă șurubul conducător intră în rezonanță cu frecvența sistemului de comandă al motorului [30] (Figura 8.5).

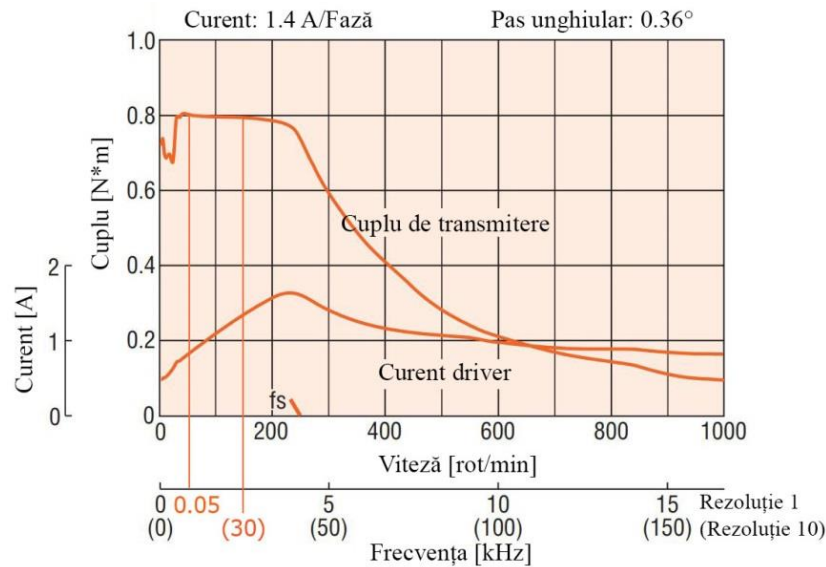


**Figura 8.5** Sistemul de avans pentru microelectroeroziune asistată de ultrasunete în stadiul asamblat

### 8.2.1. Determinarea frecvențelor utilizate pentru comanda motorului pas cu pas

Pentru a determina frecvențele la care este supus șurubul conducător, este utilizată diagrama MPP din Figura 8.6. Acționarea sistemului de avans se realizează cu cuplu maxim, pentru a asigura accelerația maximă a rotorului, esențială pentru minimizarea timpului de răspuns.





**Figura 8.6** Diagrama viteză – cuplu a MPP [21]

Conform **Figura 8.6**, plaja de frecvență necesară ca motorul să opereze la cuplu maxim este între 0.05 – 30 kHz. Utilizând frecvențele limită, se calculează viteza maximă și minimă a sistemului de avans cu formulele:

$$v_{max} = i * f_{max} [mm/s] \quad (8.1)$$

$$v_{min} = i * f_{min} [mm/s] \quad (8.2)$$

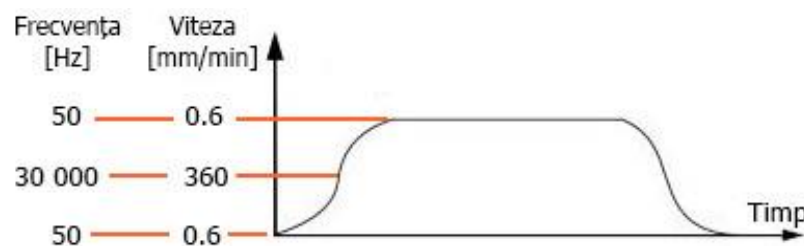
unde:  $i$  – incrementul linear al sistemului de avans [mm];  $f_{max}$  – frecvența maximă a impulsurilor [Hz];  $f_{min}$  – frecvența minimă a impulsurilor [Hz];

La fiecare impuls, se efectuează o deplasare cu un increment linear cu valoarea de 0.2  $\mu\text{m}$ , frecvența maximă este de 30000 Hz, iar frecvența minimă este de 50 Hz. Înlocuind în formulele (8.1), și (8.2) se obține viteza maximă și minimă a sistemului de avans:

$$v_{max} = 2 * 10^{-4} * 30000 \Rightarrow v_{max} = 6 \text{ mm/s} \Rightarrow v_{max} = 360 \text{ mm/min}$$

$$v_{min} = 2 * 10^{-4} * 50 \Rightarrow v_{min} = 0.01 \text{ mm/s} \Rightarrow v_{min} = 0.6 \text{ mm/min}$$

Motorul pas cu pas, prin intermediul software-ului programat, accelerează și decelerează utilizând un profil de viteză de tip „S” (**Figura 8.7**), ca mod de prevenție pentru șocurile induse de mișcări bruște.



**Figura 8.7** Profil de viteză „S”, utilizat la deplasarea MPP

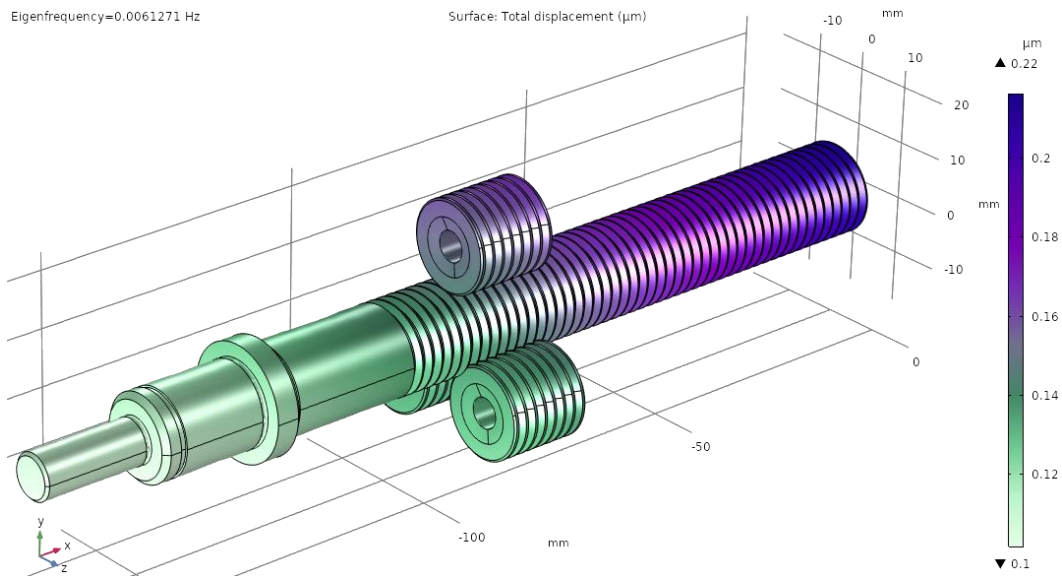
În timpul procesului de prelucrare microEDM+US, sistemul de comandă utilizează frecvența de 50 Hz. În cazul unui scurt-circuit sau a unei prelucrări în gol, deplasarea se realizează astfel: se pornește cu o accelerație care corespunde cu frecvența de 50 Hz până la 30000 Hz (punctul de inflexiune), după care urmează o decelerare care corespunde cu frecvența de 50 Hz, conform **Figura 8.7**.

Profilul vitezei arată că valoarea frecvenței de acționare a MPP, cea mai utilizată este aceea de 50 Hz, aceasta fiind valoarea de palier. Frecvențele folosite pentru profilul „S”, sunt tranzitorii, iar în jurul punctului de inflexiune, acestea sunt apropiate de valoarea maximă, de 30000 Hz.

### 8.2.2. Simularea privind frecvența proprie

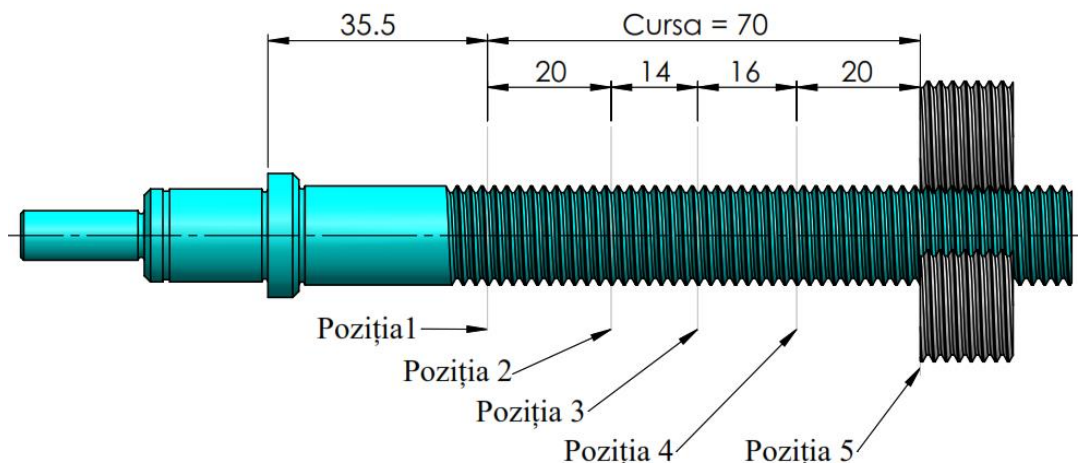
Simularea este realizată în Comsol Multiphysics, modulul Solid Mechanics cu studiul Eigenfrequency.

Având în vedere că frecvența minimă este de 50 Hz, se caută un număr de șase frecvențe în jurul acestei valori nominale, rezultatul fiind prezentat în **Figura 8.8**:



**Figura 8.8** Modelul rezultat în urma studiului, unde frecvența proprie a șurubului conducător este de 0.00612 Hz la valoarea nominală de 50 Hz

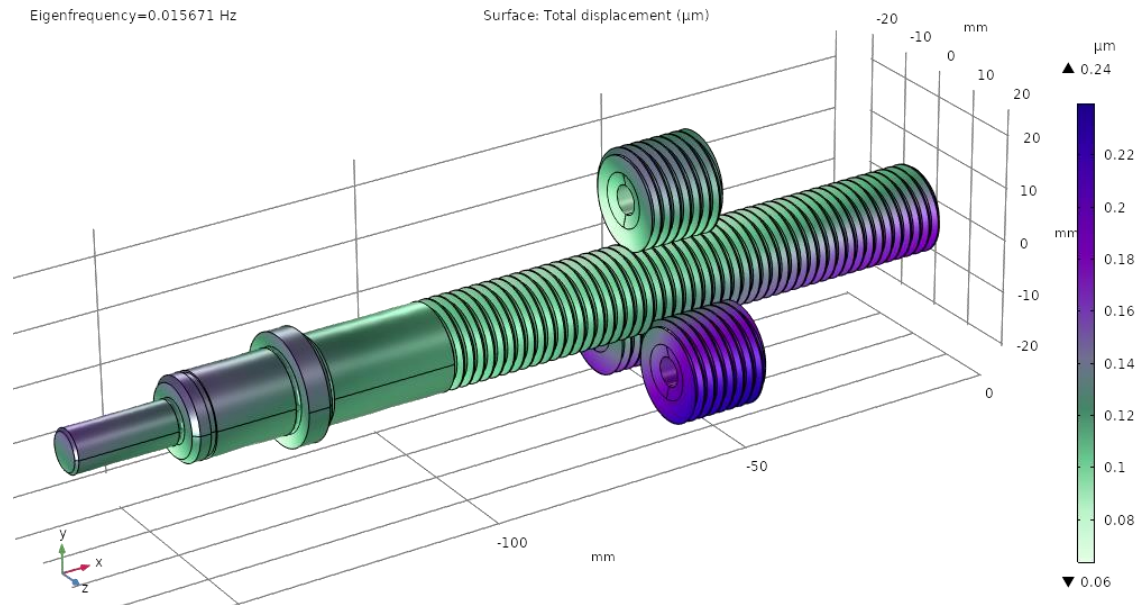
Poziția celor trei role nu este fixă, fiind parametrizată. Astfel, ca studiul să fie relevant, frecvența proprie trebuie testată când acestea sunt în diferite poziții, conform cu **Figura 8.9**.



**Figura 8.9** Șurub conducător cu role în diferite poziții

### 8.2.3. Rezultate

În **Figura 8.10**, se prezintă, spre exemplificare, rezultatul obținut pentru poziția 3 și frecvența nominală căutată de 50 Hz.



**Figura 8.10** Modelul rezultat în urma studiului (poziția 3), unde frecvența proprie a șurubului conducător este de 0.01567 Hz

Rezultatele pentru fiecare frecvență corespunzătoare pozițiilor definite mai sus, sunt prezentate în **Tabelul 8.4**. Acestea arată că sistemul de avans nu intră în rezonanță cu frecvența de acționare a motorului pas cu pas, la acest regim de funcționare. Iar pentru frecvența de testare de 30000 Hz, diferența este de peste 100 Hz.

O excepție este poziția 5, la frecvența de testare de 30000 Hz, unde diferența între frecvențe este foarte mică (15 Hz). Aceasta ar însemna că sistemul de avans execută o deplasare (avans sau retragere) cu viteza maximă la capătul cursei, ceea ce nu este posibil. Luând în calcul că pozițiile sunt tranzitorii, se poate spune că sistemul de avans nu intră în rezonanță.

În urma testelor privind timpul de răspuns al sistemului de avans, s-a constatat utilitatea comenzii MPP cu frecvența de 1000 Hz. În aceste condiții, prezintă interes studiarea frecvenței proprii a sistemului șurub role, în jurul acestei valori.

Se introduce în setarea studiului 1000 Hz și se determină frecvența proprie în cele cinci poziții ale rolelor. Rezultatele se prezintă în **Tabelul 8.4**.

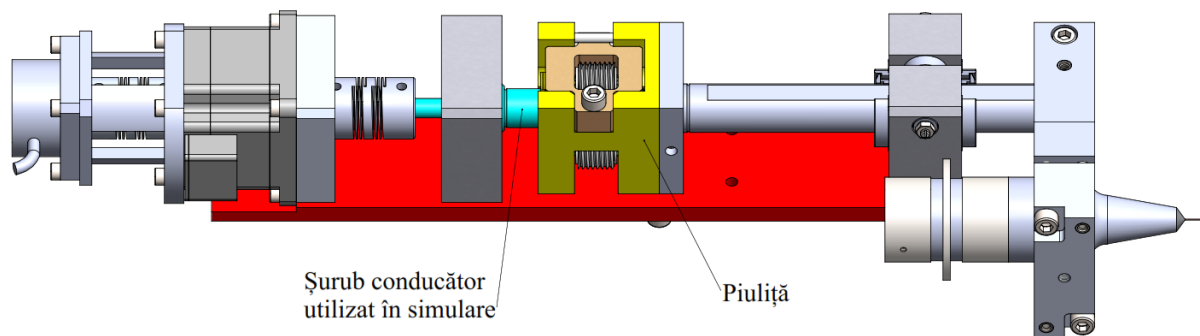
**Tabelul 8.4** Frecvențele proprii obținute la simulările numerice

Frecvența de testare [Hz]	Frecvența proprie [Hz]				
	Poziția 1	Poziția 2	Poziția 3	Poziția 4	Poziția 5
50	0.00561	0.00361	0.00606	0.00619	0.00426
	<b>0.00612</b>	<b>0.00948</b>	<b>0.01567</b>	<b>0.01363</b>	<b>0.00919</b>
<b>Diferența [Hz]</b>	49.99	49.99	49.98	49.98	49.99
1000	<b>1898</b>	<b>0.01038</b>	<b>0.01028</b>	<b>0.01274</b>	<b>2014</b>
	1962	1906	1988	2075	2085
	2418	1970	2078	2273	2251
	2643	2412	2390	2325	2528
<b>Diferența [Hz]</b>	898	999	999	999	1014
30000	26776	24686	27266	26712	25480
	29067	26494	28098	<b>30321</b>	27224
	<b>30108</b>	29226	28817	31483	29321
	30685	<b>30283</b>	<b>30350</b>	31791	<b>29985</b>
	32017	32796	30867	32218	33455
	33240	33589	32847	32987	33976
<b>Diferența [Hz]</b>	108	283	350	321	15

Se are în vedere că pozițiile considerate sunt tranzitorii și implicit, valorile acestor frecvențe proprii ale sistemului șurub-piuliță sunt de asemenea, tranzitorii. De asemenea, pe profilul "S" al vitezei de deplasare a mecanismului de avans, valoarea frecvenței de acționare corespunde punctului de inflexiune, care este de asemenea, tranzitoriu. Se consideră că sarcina utilă maximă de 10 N, deplasată de sistemul de avans, acționează în sensul reducerii frecvenței proprii a acestuia. Deci se poate afirma că acesta nu intră în rezonanță cu frecvența de acționare a MPP, în regimurile de funcționare prevăzute, conform datelor din **Tabelul 8.4**.

### 8.3. Modelarea și simularea deformației șurubului conducător

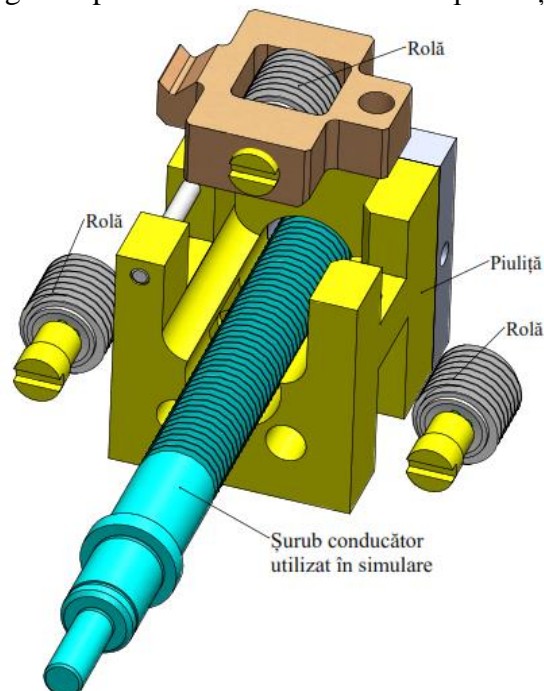
Deformarea se referă la schimbarea dimensiunii sau formei unui obiect aflat sub o anumită sarcină. În acest studiu se analizează deformarea spirelor șurubului conducător sub presiunea realizată de piuliță (**Figura 8.11**). Metodologia de simulare numerică urmează mai multe etape prezentate în continuare [31].



**Figura 8.11** Sistemul de avans pentru microelectroeroziune asistată de ultrasunete în configurația simulată la deformare în timpul funcționării

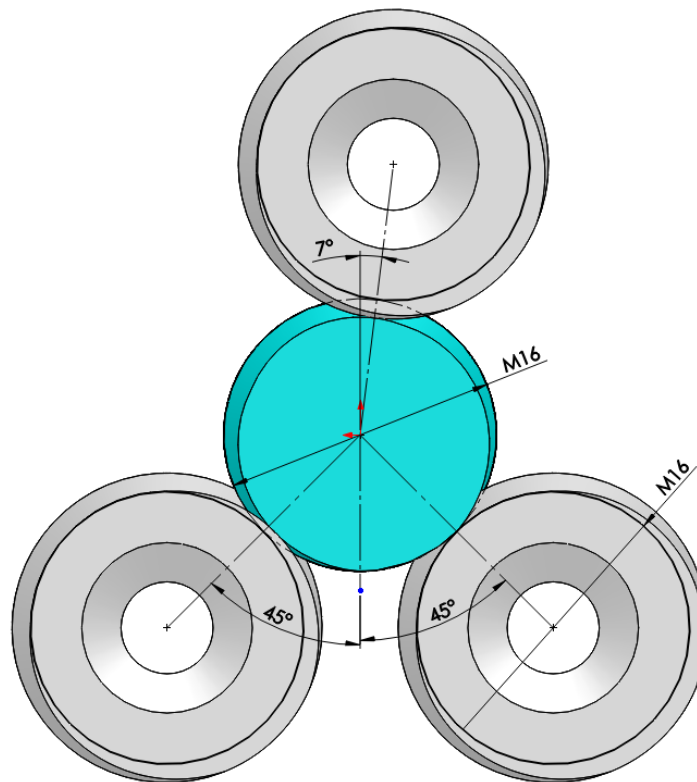
#### 8.3.1. Determinarea suprafețelor de contact

Pentru a determina deformarea spirelor șurubului conducător trebuie construite (determinate) suprafețele de contact. Din **Figura 8.12** se observă că în corpul piuliței sunt montate trei role M16x2, care sunt singurele piese ce intră în contact cu spirele șurubului conducător.



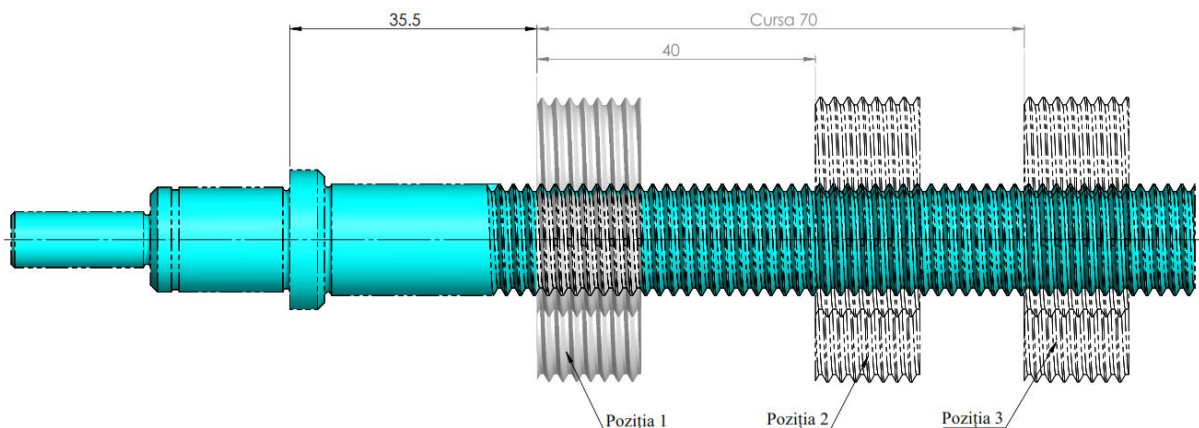
**Figura 8.12** Ansamblul șurub-piuliță

În **Figura 8.13**, este ilustrată poziția rotelor față de șurubul conducător, și se poate observa că două din ele sunt amplasate simetric la un unghi de  $45^\circ$ , iar una este plasată deasupra la  $7^\circ$  (unghiul format de verticală și dreapta care conține centrul geometric al secțiunii șurubului și rolei).



**Figura 8.13** Poziția rotelor față de șurubul conducător

Pentru a simula deformarea spirelor șurubului conducător în diferite poziții ale rotelor, mai sunt necesare două seturi de suprafețe de contact izolate. Este utilizată comanda “Lpattern” pentru a realiza poziția 2 (40 mm) și poziția 3 (70 mm) din **Figura 8.14**.

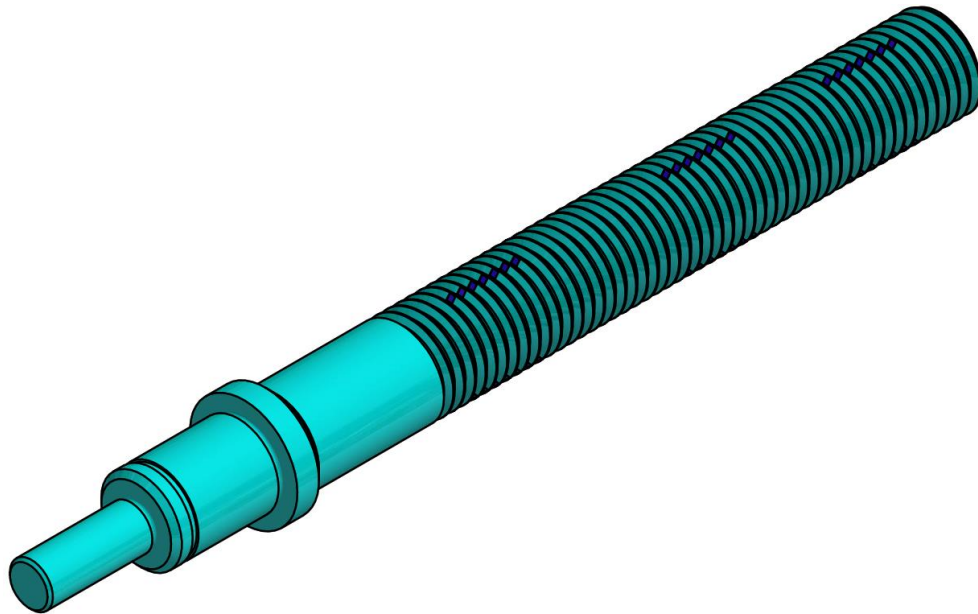


**Figura 8.14** Poziții multiple pentru simularea deformării

### 8.3.2. Simularea deformării

Modelul șurubului conducător este exportat din Solidworks (unde a fost creat) și introdus în Inventor, în care s-a realizat simularea. În **Figura 8.15** este ilustrat șurubul conducător, cu suprafețele izolate evidențiate care reprezintă suprafețele de contact cu roțile în diverse poziții.



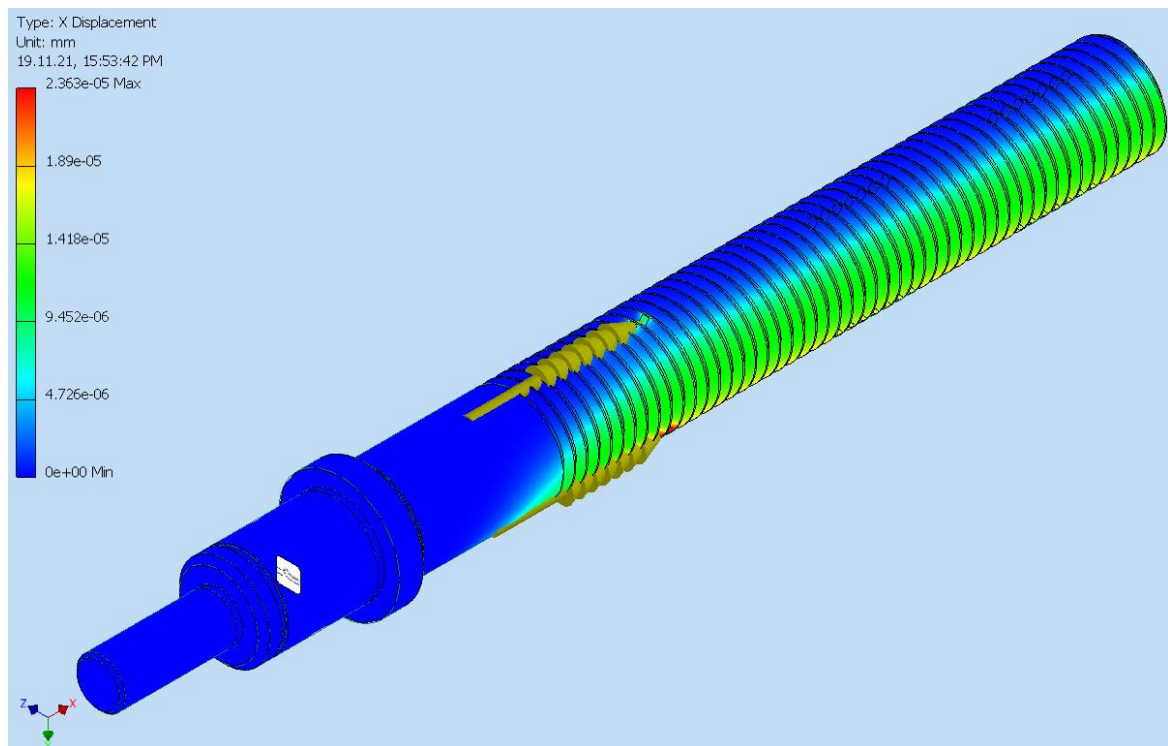


**Figura 8.15** Șurubul conducător cu suprafețele de contact ale rolelor în cele trei poziții

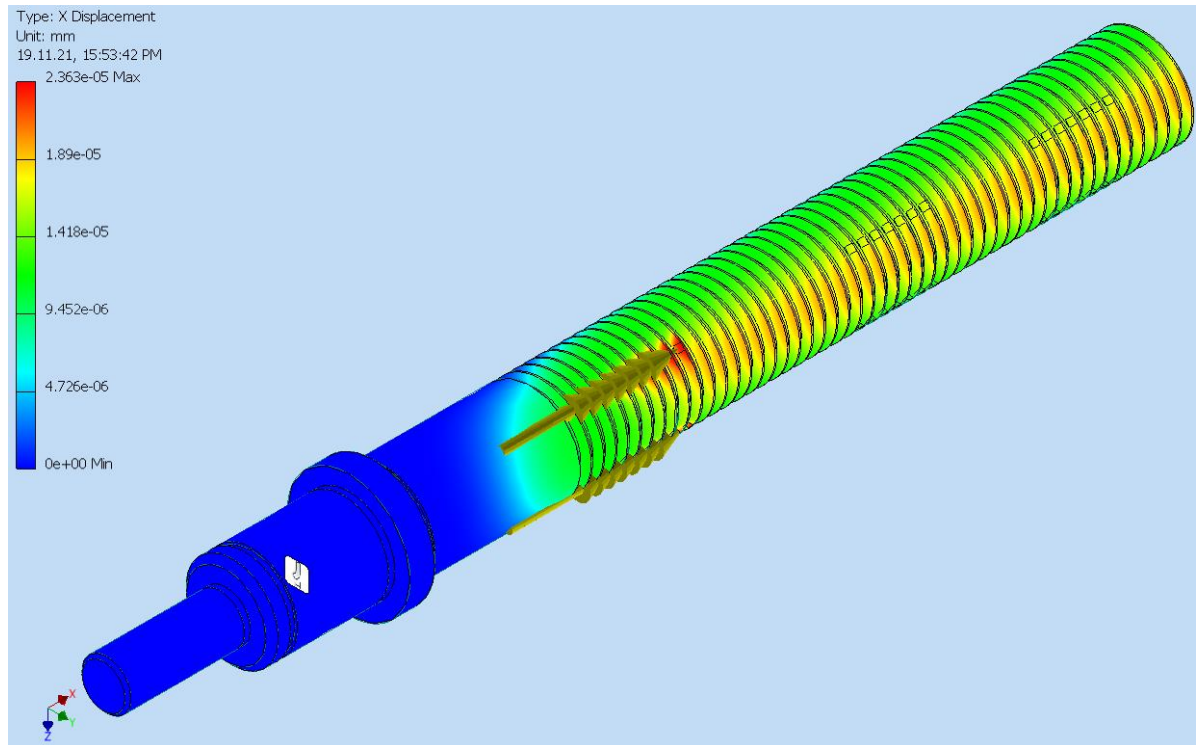
Pe suprafețele izolate din poziția 1 (v. **Figura 8.14**) sunt repartizate sarcinile (forțele). Masa corpului piuliței cu toate piesele asamblate (lanțul ultrasonic, corpul piuliței, coloana de ghidare, prisme etc.) este estimată la 1 Kg. Înmulțind masa cu accelerația gravitațională,  $9.81 m/s^2$ , rezultă o forță de  $9.81 N$ , care este aproximată la o valoare acoperitoare de  $F = 10 N$ , fiind utilizată în simulare.

### 8.3.3. Rezultate

Rezultatele simulării numerice sunt prezentate în **Figura 8.16** care ilustrează deformația de-a lungul axei X. Deformația maximă este de  $2.363e-05$  mm, adică  $0.02363 \mu m$ .



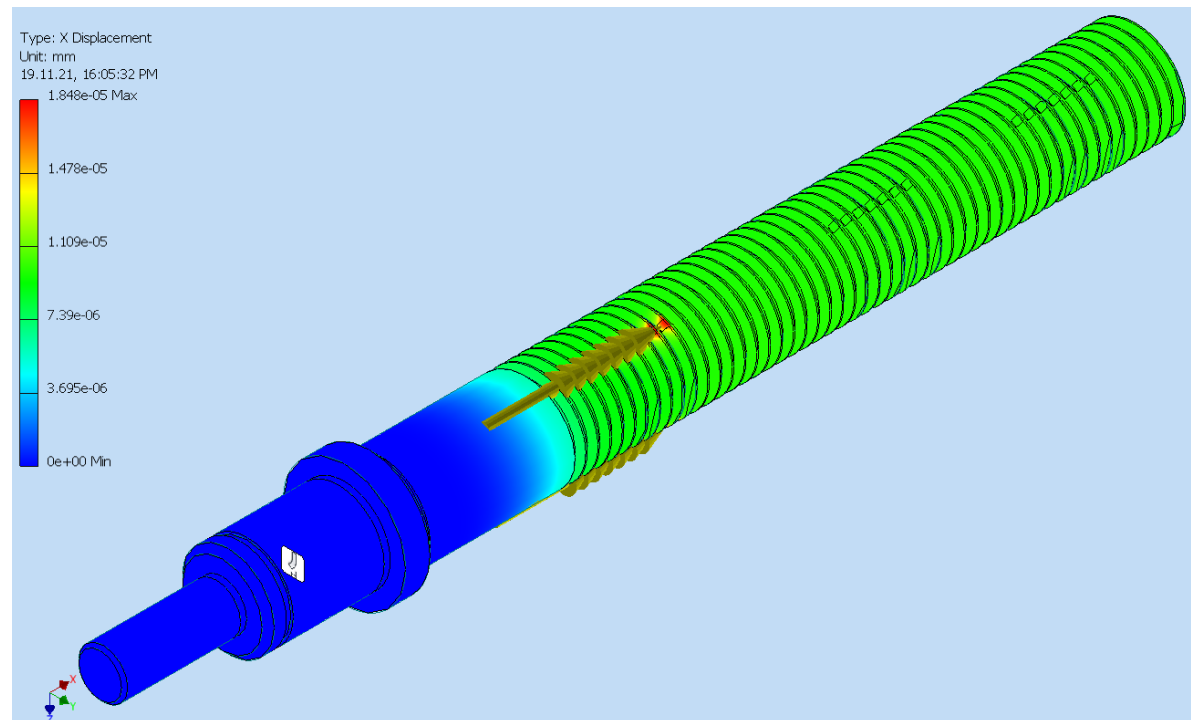
a) Deformația corespunzătoare rolei 1 dispusă la  $7^\circ$



b) Deformația corespunzătoare rolilor 2 și 3 dispuse la 45°

**Figura 8.16** Deformarea de-a lungul axei X

Se poate observa că deformarea nu este distribuită uniform, datorită rolilor care nu sunt dispuse la unghiuri egale pe circumferință. Astfel că deformarea este mai mare în zona celor două role dispuse la 45°. Spre comparație, este realizată simularea numerică pentru un șurub conducător identic, dar cu rolele dispuse la unghiuri egale pe circumferință, de 120° care arată pentru aceleași poziții ale rolilor pe lungimea cursei de lucru, rezultate diferite (**Figura 8.17**).

**Figura 8.17** Deformarea de-a lungul axei X a șurubului conducător cu role dispuse la unghiuri de 120°

Deformațiile rezultate conform **Figura 8.16** sunt foarte reduse în raport cu rezoluția de  $0.2 \mu\text{m}$  a sistemului de avans. Avantajul acestei variante constructive este că rola superioară dispusă asimetric la unghi de  $7^\circ$  acționează sub forma unei pârgii, exercitând o forță de apăsare mai mare decât în varianta cu trei role dispuse la unghiuri egale pe circumferință. Rezultatele deformării pentru șurubul conducător proiectat sunt prezentate în **Tabelul 8.5**.

**Tabelul 8.5** Deformarea maximă de-a lungul axei X

Poziția	Cota față de începutul cursei [mm]	Deformarea maximă [ $\mu\text{m}$ ]
1	0	0.02363
2	40	0.04221
3	70	0.05727

Deformația maximă în cazul șurubului conducător proiectat este de  $0.057 \mu\text{m}$  rezultată din simularea numerică, deci se poate presupune că deformarea are un impact minim asupra stabilității și preciziei prelucrării.

Rezultatele simulării numerice privind deformarea șurubului conducător cu rolele dispuse la un unghi de  $120^\circ$  sunt prezentate în **Tabelul 8.6**.

**Tabelul 8.6** Deformarea maximă de-a lungul axei X pentru șurubul cu rolele dispuse la  $120^\circ$

Poziția	Cota față de începutul cursei [mm]	Deformarea maximă [ $\mu\text{m}$ ]
1	0	0.01848
2	40	0.03116
3	70	0.0408

De asemenea, se observă și o deformare mai mică în cazul dispunerii rolelor la  $120^\circ$ ,  $0.041 \mu\text{m}$  față de varianta anterioară  $0.057 \mu\text{m}$ , valorile rezultate fiind cu un ordin de mărime mai mici în raport cu rezoluția sistemului de avans.

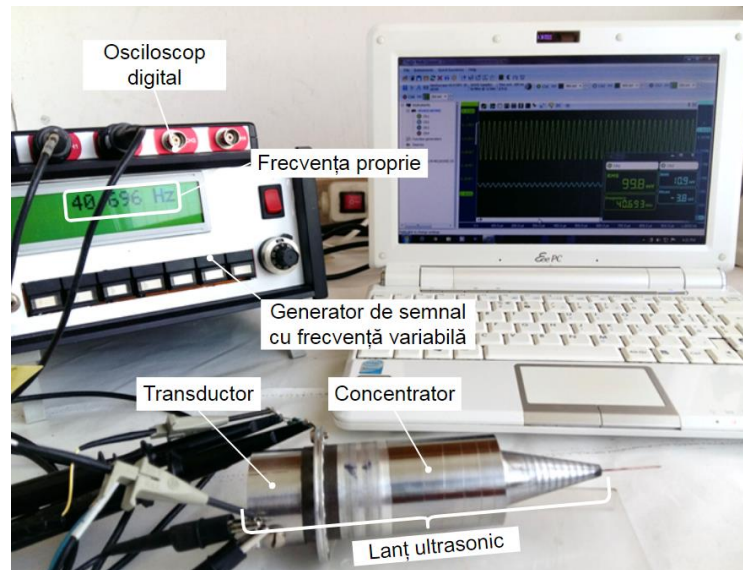


## Capitolul 9. Proiectarea procesului tehnologic, realizarea și testarea sistemului de avans

### 9.1. Testarea concentratorului ultrasonic

A fost testat lanțul ultrasonic proiectat și realizat în condiții de laborator - nivelul 4 de maturitate tehnologică - TRL 4.

Lanțul ultrasonic care include electrodul-sculă pentru microgăuri este conectat la un osciloscop și la un generator de semnal cu frecvență variabilă - **Figura 9.1**.



**Figura 9.1** Stand experimental pentru determinarea frecvenței proprii a concentratorului fizic

Se menționează că pentru o calitate ridicată a transductorului PZT, diferența între frecvențele de rezonanță-serie și paralel trebuie să fie de cel puțin 1 - 2 kHz (condiție îndeplinită în acest caz). De asemenea, la rezonanța-serie, (folosită în cazul de față) tensiunea pe canalul CH2, vizualizată pe ecranul osciloscopului trebuie să fie minimă – **Figura 9.2**, iar la rezonanța-paralel, tensiunea trebuie să fie maximă.

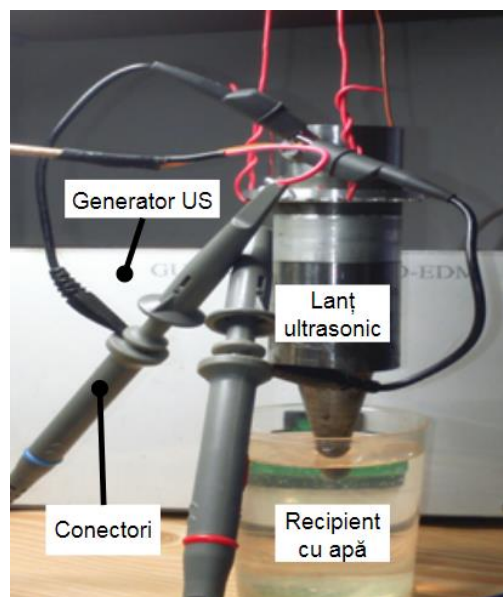


**Figura 9.2** Detaliu al ecranului osciloscopului digital cu determinarea frecvenței de rezonanță 40693 kHz

Frecvența proprie determinată a concentratorului fizic este de 40696 Hz, față de frecvența proprie a concentratorului modelat de 40557 Hz. Se observă o diferență între modelul fizic și modelul simulat numeric, deoarece la realizarea fizică intervin: abateri ale compoziției chimice și neomogenității ale materialelor utilizate, abaterile dimensionale și de formă ale suprafețelor de joncțiune ale componentelor, etc.

Au fost executate ajustări (reduceri) ale lungimii treptei superioare a concentratorului ultrasonic (singura disponibilă după asamblarea electrodului-sculă filiform) și teste iterative pentru atingerea frecvenței țintă de 40805 Hz.

În cadrul aceluiași experimentări, a fost realizată și testarea fenomenului de cavitație la vârful lanțului ultrasonic, unde se găsește electrodul-sculă pentru microprelucrări EDM+US, prin imersare în apă și lanțul ultrasonic conectat la generatorul de ultrasunete cu frecvența nominală de 40 kHz - realizat de domnul inginer Ștefan Nițșor - care a debitat frecvența de rezonanță-serie, conform cu **Figura 9.3**.

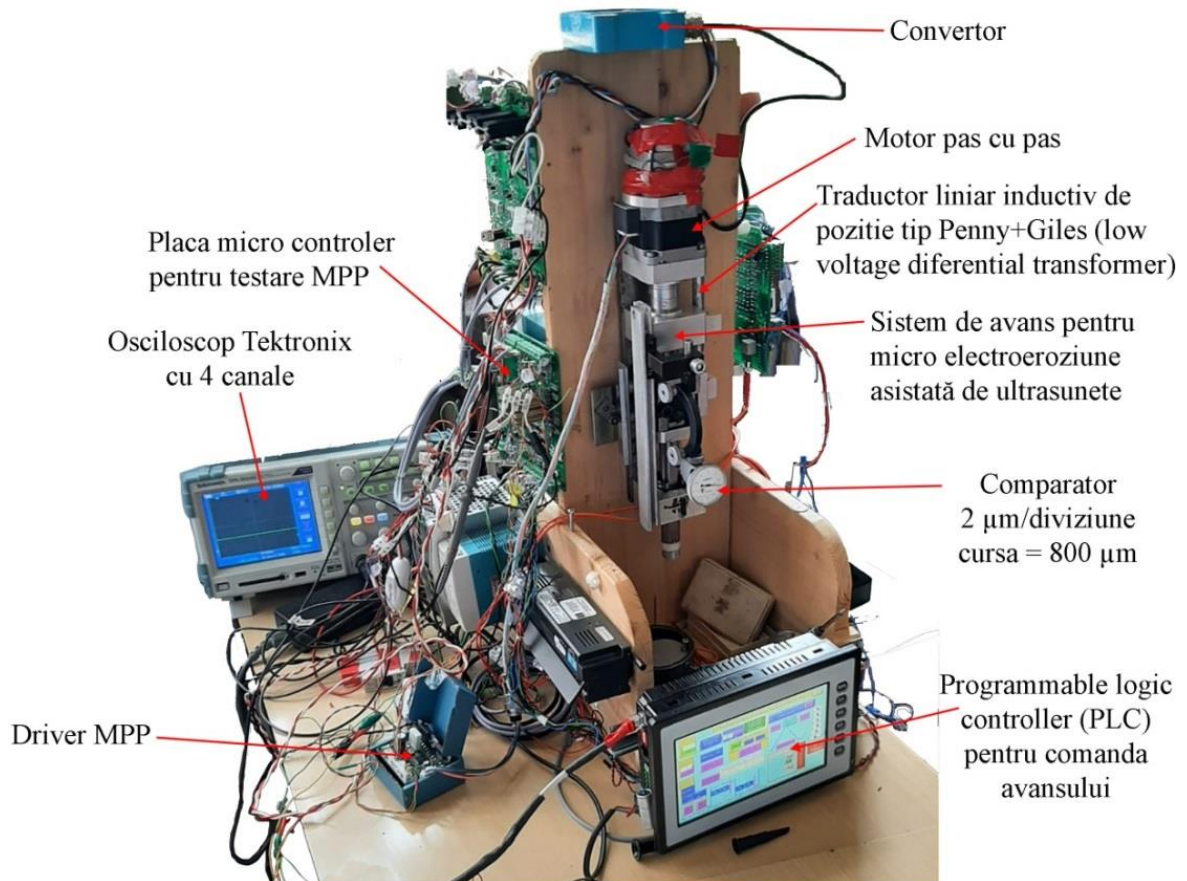


**Figura 9.3** Testarea cavitației ultrasonice

În timpul funcționării, s-au observat bule de cavitație produse la extremitatea lanțului ultrasonic, ceea ce confirmă funcționarea adecvată a acestuia.

## 9.2. Testarea deplasării sistemului de avans

Sistemul de avans a fost testat în ceea ce privește modul de realizare a deplasărilor în condiții de laborator (nivelul 4 de maturitate tehnologică - TRL4), în cadrul Facultății de Electronică, Telecomunicații și Tehnologia Informației (ETTI), Centrul de Electronică Tehnologică și Tehnici de Interconectare CETTI din cadrul Universității POLITEHNICA București, pe un stand conceput de dl. inginer Gheorghe Jitianu. Experimentările au fost realizate sub îndrumarea d-lui inginer Gheorghe Jitianu de la EDMING SERV SRL și a domnului Conf. dr. ing. Andrei Drumea de la facultatea ETTI. Aceste teste au avut și scopul de a valida în condiții de laborator, modelările și simulările aferente sistemului de avans, prezentate anterior. Standul de testare al sistemului de avans este prezentat în **Figura 9.4**



**Figura 9.4** Standul de testare al sistemului de avans

În cadrul acestui subcapitol, se va testa prototipul sistemului de avans pentru microEDM+US, urmărindu-se: modul de execuție a deplasărilor la diferite frecvențe de comandă ale motorului pas cu pas, timpul de întârziere la execuția comenzilor pentru diferite frecvențe de acționare ale motorului pas cu pas și în final, deplasarea pe o curbă cu profil de accelerație de tip “S”.

Modul de deplasare al sistemului de avans, adoptat în cadrul testelor care este prezentat în continuare. Deplasarea se realizează în pachete de 5 micropași. Un pas de  $1\ \mu\text{m}$  este format din 5 micropași de  $0.2\ \mu\text{m}$  cu o pauză între ei de  $T_{\mu p}$  ms. Secvența comenzii este prezentată în **Tabelul 9.1**:

**Tabelul 9.1** Secvența unui pas de  $1\ \mu\text{m}$

Micropas $0.2\ \mu\text{m}$	<b>Micro Pauză</b>	Micropas $0.2\ \mu\text{m}$	<b>Micro Pauză</b>	Micropas $0.2\ \mu\text{m}$	<b>Micro Pauză</b>	Micropas $0.2\ \mu\text{m}$	<b>Micro Pauză</b>	Micropas $0.2\ \mu\text{m}$
--------------------------------	------------------------	--------------------------------	------------------------	--------------------------------	------------------------	--------------------------------	------------------------	--------------------------------

unde:  $F_{PLC}$  – frecvența comandată din controler-ul logic programabil - PLC [Hz].

Frecvențele utilizate la testare și pauzele aferente sunt evidențiate în **Tabelul 9.2**:

**Tabelul 9.2** Valori ale micro pauzei funcție de frecvență

$F_{PLC}$ [Hz]	$T_{\mu p}$ [ms]
100	10
200	5
500	2
1000	1

Între fiecare execuție a unui pas de  $1\ \mu\text{m}$  este dată o altă pauză, secvența fiind prezentată în **Tabelul 9.3**. Valoarea pauzei este setată din PLC (**P**rogrammable **L**ogic **C**ontroller), ea fiind aleasă pentru deplasări într-un timp cât mai scurt dar și pentru ca motorul să plece de pe loc la executarea

următorului pas de 1  $\mu\text{m}$ . Astfel, se evită mișcarea din inerție a rotorului MPP indusă de execuția anterioară.

**Tabelul 9.3** Secvența unei deplasări succesive de 1  $\mu\text{m}$

Pas	Pauză	Pas	Pauză	Pas	...
1 $\mu\text{m}$		1 $\mu\text{m}$		1 $\mu\text{m}$	

În **Tabelul 9.4** este evidențiată secvența de deplasare a sistemului de avans.

**Tabelul 9.4** Secvență de deplasare

Pas de 1 $\mu\text{m}$									Pauză	Pas de 1 $\mu\text{m}$									⋮
0.2 $\mu\text{m}$	$T_{\mu\text{P}}$	0.2 $\mu\text{m}$	$T_{\mu\text{P}}$	0.2 $\mu\text{m}$	$T_{\mu\text{P}}$	0.2 $\mu\text{m}$	$T_{\mu\text{P}}$	0.2 $\mu\text{m}$		0.2 $\mu\text{m}$	$T_{\mu\text{P}}$	0.2 $\mu\text{m}$	$T_{\mu\text{P}}$	0.2 $\mu\text{m}$	$T_{\mu\text{P}}$	0.2 $\mu\text{m}$	$T_{\mu\text{P}}$	0.2 $\mu\text{m}$	

Sistemul de avans utilizează două tipuri de deplasări adecvate procesului de prelucrare prin microEDM+US, și anume:

- 1. Tehnologice** – pentru distanțe mici și poziționări precise, este utilizată în prelucrare;
- 2. Auxiliare** – pentru distanțe mari, fără precizie, este utilizată pentru retrageri sau apropieri rapide.

În acest caz, sistemul de avans folosește secvența de deplasare din **Tabelul 9.4**, pentru executarea unei mișcări pe distanța mare ( $> 10 \mu\text{m}$ ). Testarea este concentrată pe tipul de deplasare auxiliară pentru că este mai dificil de realizat.

În cadrul software-ului sunt implementate două comenzi speciale [37] [38]:

**1. Ieșirea din scurt-circuit (prioritate 0)** – obiectivul principal este să nu se deterioreze electrodul-sculă și să nu facă arc electric. Astfel că, după 0.2 ms, când s-a constatat că electrodul-sculă a intrat în scurt-circuit, se blochează impulsurile de electroeroziune și simultan se dă comanda de deplasare auxiliară (retragere rapidă). Astfel că atunci când se retrage, tensiunea nu este aplicată pe electrodul-sculă și nu există riscul unui arc electric.

**2. Avansul cu 0.2  $\mu\text{m}$  (prioritate 1)** – sunt analizate 100 de descărcări pentru a determina decizia de avans sau retragere cu 0.2  $\mu\text{m}$ .

Oscilația ultrasonică prezintă două semiperioade (**Figura 9.5**), cea de-a doua semiperioadă, în care are loc întinderea lichidului dielectric (datorată fenomenelor de capilaritate dată de dimensiunea micrometrică a interstițiului de prelucrare la microEDM) este considerată favorabilă descărcărilor. În fiecare semiperioadă se urmărește dacă s-a produs descărcarea, poziția și momentul acesteia.

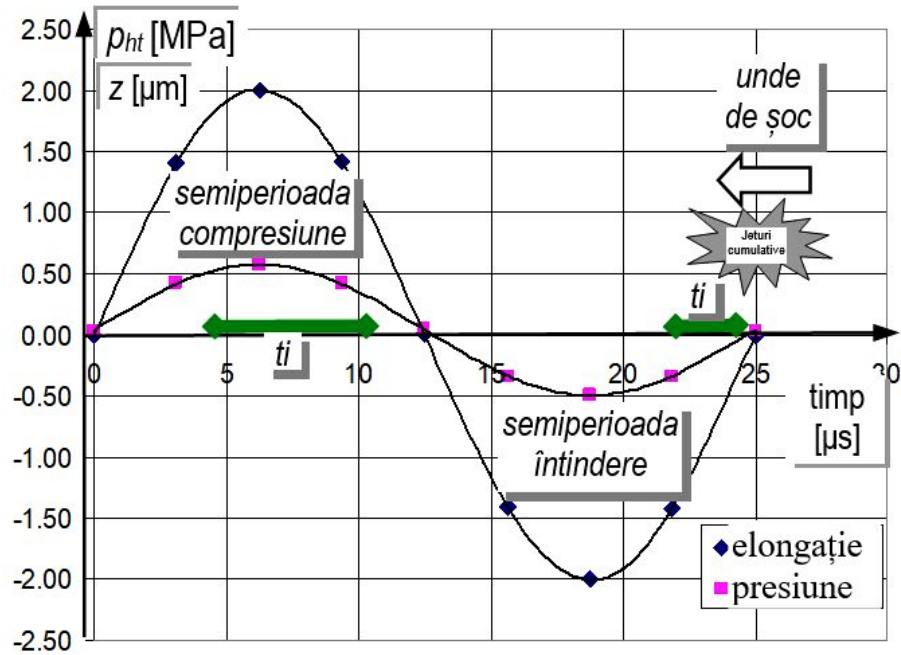
Dacă descărcarea cu durata  $t_i$  marcată cu verde (v. **Figura 9.5**) se produce după ce a început semiperioada (după 12.5  $\mu\text{s}$ ), corespunzătoare unei frecvențe nominale de 40 kHz, înseamnă că a intrat în semiperioada favorabilă.

Dacă descărcarea se produce înainte atunci aceasta se situează în semiperioada defavorabilă.

Procesul microEDM+US este condus conform unei strategii de tipul celei de mai jos, cu valori ale parametrilor, care pot fi modificați/ajustați pe cale experimentală.

Este contorizată fiecare descărcare după ce s-au produs maximum 100 de descărcări. În funcție de majoritatea descărcărilor este luată o decizie. Dacă sunt în semiperioada favorabilă se avansează cu un singur impuls, comandat de MPP, adică un increment axial de 0.2  $\mu\text{m}$ . Dacă sunt în perioada nefavorabilă se comandă retragerea cu un singur impuls, increment axial de 0.2  $\mu\text{m}$ .





**Figura 9.5** Cele două semiperioade aferente cavitației induse ultrasonic la microEDM+US, după [16]

### 9.2.1. Testarea modului de execuție a pașilor

În prima etapă se va testa dacă sistemul de avans execută toți pașii comandați la frecvențe diferite. Din PLC, s-a selectat deplasarea pe o distanță de 200  $\mu\text{m}$  la frecvențele de 100, 200, 500 și 1000 Hz în ambele sensuri, repetate de 2 ori. Rezultatele fiind prezentate în **Tabelul 9.5**:

**Tabelul 9.5** Pierderea de pași la un spațiu parcurs de 200  $\mu\text{m}$

Nr. crt.	Frecvența comandată din PLC [Hz]	SENS	Spațiu parcurs electronic [ $\mu\text{m}$ ]	Spațiu parcurs fizic [ $\mu\text{m}$ ]	Diferența [ $\mu\text{m}$ ]
1	100	JOS	199	189	-10
2	100	JOS	199	183	-16
3	100	SUS	199	187	-12
4	100	SUS	199	207	+8
5	200	JOS	199	179	-20
6	200	JOS	199	187	-12
7	200	SUS	199	189	-10
8	200	SUS	199	204	+5
9	500	JOS	199	193	-6
10	500	JOS	199	181	-18
11	500	SUS	199	189	-10
12	500	SUS	199	205	+6
13	1000	JOS	199	187	-12
14	1000	JOS	199	181	-18
15	1000	SUS	199	177	-22
16	1000	SUS	199	197	-2

Spațiul parcurs electronic este evidențiat din PLC. Aceasta presupune că sunt numărate electronic pulsurile trimise către sistemul de avans. Teoretic sunt 200 de pulsuri ce trebuie numărate, însă apare o diferență de 1  $\mu\text{m}$  din două motive:

1. Spațiul parcurs electronic se obține prin numărarea pulsurilor de  $0.2 \mu\text{m}$  și împărțirea lor la 5. Împărțirea se face la număr întreg, nu are loc nicio aproximare, astfel că valoarea de după virgulă nu este luată în considerare;

2. Microcontroler-ul care generează pulsurile de avans are timpul de scanare de aproximativ  $1 \mu\text{s}$  iar PLC-ul care afișează pulsurile are un ceas independent și timpul de scanare variază între 5 - 10 ms. Comunicarea dintre cele două dispozitive este asincronă și întotdeauna se va pierde primul puls.

Spațiul parcurs fizic este măsurat prin intermediul unui comparator cu valoarea diviziunii de  $2 \mu\text{m}$  (Figura 9.4).

Sistemul de avans pierde pași la oricare dintre frecvențele de test. Deși valorile sunt mari (din punct de vedere al preciziei), acest tip de deplasare este utilizat doar în cazul apropierii sau retragerii rapide a electrodului-sculă. Cu toate acestea, deplasările rapide nu necesită precizie ridicată cu atributul unui timp de răspuns scăzut pentru a scoate sistemul din situații critice, scurt-circuit între scula-electrod și semifabricat sau arc continuu, respectiv, mers în gol. Mișcările de precizie sunt comandate micropas cu micropas, cu incrementul de  $0.2 \mu\text{m}$ . Acestea sunt necesare pentru avansul tehnologic, care influențează direct precizia și calitatea suprafeței prelucrate.

### 9.2.2. Testarea timpului de răspuns

În cea de-a doua etapă este testat timpul de răspuns la diferite frecvențe. Oscilogramele care urmează au fost realizate și puse la dispoziție de către EDMing SERV CONSULT SRL.

Revenind la măsurarea timpului de răspuns, se prezintă Figura 9.6 și Figura 9.7:

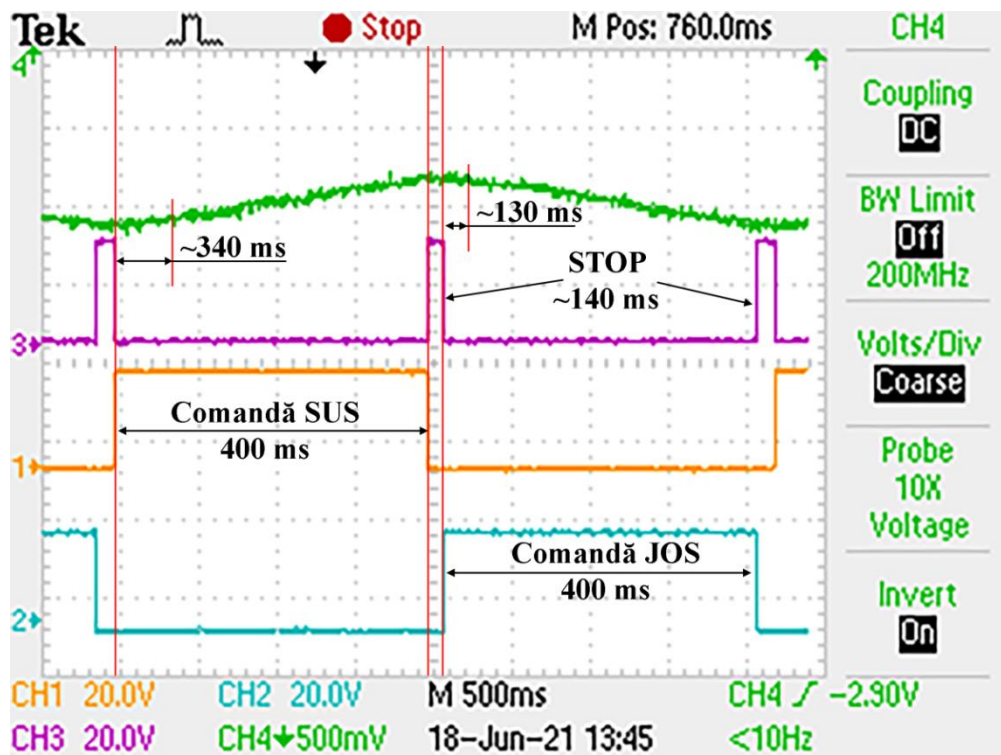
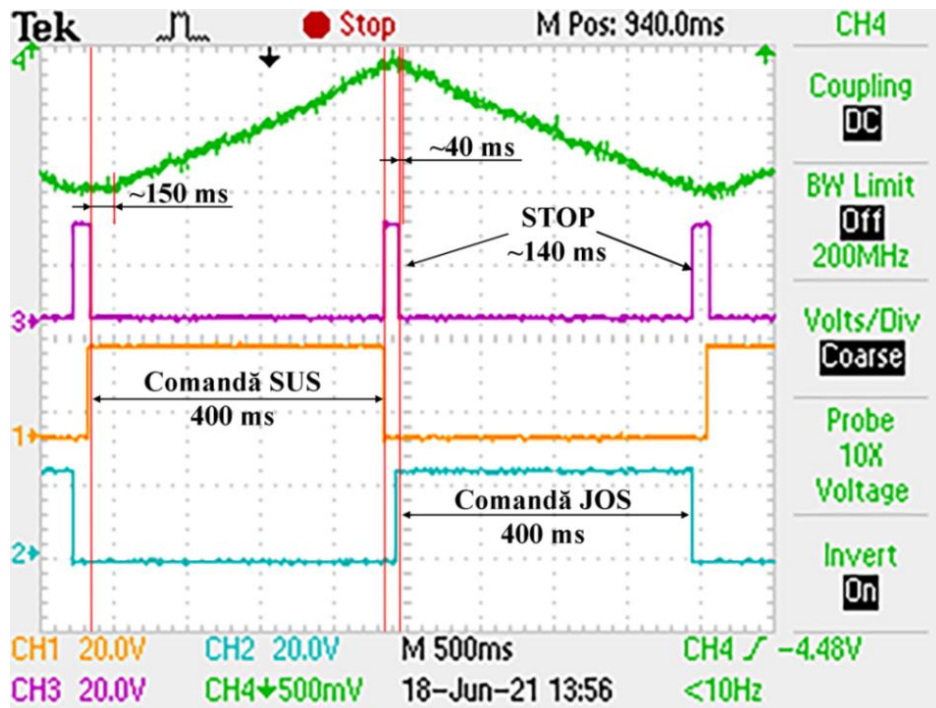


Figura 9.6 Timpul de răspuns la frecvența de 500 Hz cu durata STOP-ului de 140 ms

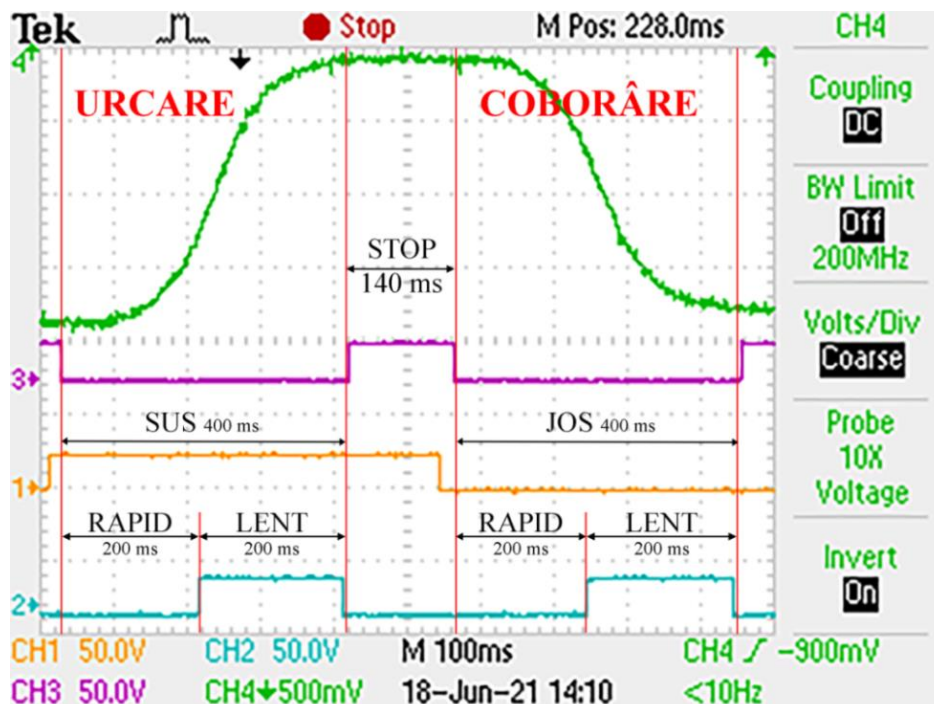


**Figura 9.7** Timpul de răspuns la frecvența de 1000 Hz cu durata STOP-ului de 140 ms

În **Figura 9.6**, se prezintă o întârziere la comanda de avans rapid la urcare de 340 ms și la coborâre 130 ms, iar în **Figura 9.7**, este înregistrată o întârziere de 150 ms la urcare, respectiv 40 ms la coborâre. Se constată că timpul de răspuns este mult mai bun la frecvența de start de 1000 Hz. Prin urmare se recomandă utilizarea acesteia, ca frecvență de start, pentru comenzi de deplasare rapidă.

### 9.2.3. Testarea deplasării pe curba „S”

În cea de-a treia etapă se urmărește dacă sistemul de avans realizează deplasarea pe o curbă tip „S” (**Figura 9.8**).



**Figura 9.8** Deplasarea în curbă „S” la frecvența de 1000 Hz cu durata SUS și JOS de 400 ms

## Capitolul 10. Concluzii finale, contribuții originale și direcții de cercetare

Din parcurgerea etapelor de cercetare și a obținerii obiectivelor stabilite în capitolul 5 au rezultat următoarele concluzii finale:

Proiectarea conceptuală a sistemului de avans pentru microelectroeroziune asistată de ultrasunete are la bază formularea unor funcții principale și elaborarea structurii acestora prin stabilirea interacțiunii dintre elementele sistemului tehnologic, care răspund cerințelor procesului hibrid de microelectroeroziune asistată de ultrasunete și care satisfac aceste cerințe, după cum urmează:

- Execuția deplasărilor de avans/retragere de două tipuri: *tehnologice* pentru realizarea procesului de îndepărtare a materialului și rapide în vederea ieșirii din situațiile de scurt-circuit sau arc continuu dintre suprafețele electrodului-sculă și semifabricat și respectiv, funcționare în gol, lipsa descărcărilor electroerozive;
- Monitorizarea poziției electrodului-sculă relativ la suprafața prelucrată, care să satisfacă condițiile de precizie impuse de microprelucrarea electroerozivă;
- Execuția deplasărilor cu timp de răspuns minim în condițiile desfășurării procesului într-un interstițiu de prelucrare extrem de redus, 0 - 5  $\mu\text{m}$  care variază ca urmare a vibrațiilor electrodului-sculă cu frecvență ultrasonică;
- Execuția deplasărilor cu profilul de viteză și accelerație compatibil cu precizia cerută la microelectroeroziune; aceasta are implicații atât asupra poziționării cât și asupra uzurii componentelor sistemului de avans;
- Perpendicularitatea axei sistemului de avans pe masa mașinii pentru îndeplinirea condițiilor de precizie prescrise suprafețelor generate prin microelectroeroziune;
- Reglarea înclinării axei sistemului de avans pentru obținerea unor găuri înclinate, care contribuie la diversificarea posibilităților tehnologice ale sistemului tehnologic pe care este implementat sistemul de avans;
- Minimizarea transmiterii vibrațiilor ultrasonice ale lanțului ultrasonic în cadrul sistemului de avans prin prinderea lanțului ultrasonic într-un plan orizontal, care conține punctul nodal, de amplitudine nulă;
- Funcționarea sistemului de avans în afara rezonanței, care presupune suprapunerea frecvenței proprii a sistemului de avans peste aceea a unor factori perturbatori externi, în mod special, aceea a funcționării motorului de acționare a mecanismului șurub-piuliță;
- Deplasarea electrodului-sculă cu increment liniar submicronic, condiție care este compatibilă cu dimensiunea interstițiului de prelucrare în intervalul 0 - 5  $\mu\text{m}$  și modificarea acestuia cu amplitudinea de oscilație a electrodului-sculă cu frecvență ultrasonică.

S-au stabilit soluții tehnice principale pentru realizarea acestor funcții, aceasta fiind echivalentă cu faza 2 de maturitate tehnologică (Technology Readiness Level – TRL2), respectiv realizarea conceptului produsului sistem de avans pentru microelectroeroziune asistată de ultrasunete.

Au fost aplicate detaliat două metode consacrate, complementare și eficiente, care au urmărit creșterea calității produsului, sistem de avans pentru microelectroeroziune asistată de ultrasunete, respectiv Desfășurarea funcției calității – Quality Function Deployment, QFD, care vizează obținerea unor caracteristici tehnice, pornind de la cerințele clienților ordonate după prioritatea acestora și Analiza factorilor de defectare și efectelor acestora – Failure Mode and



Effects Analysis – FMEA, care urmărește prevenirea riscurilor în funcționare, încă din faza de concept – TRL 2 precum și adoptarea unor acțiuni preventive care conduc la eficiență economică.

Soluțiile tehnice rezultate din aplicarea celor două metode de îmbunătățirea calității au fost implementate în etapa de proiectare detaliată a produsului, sistem de avans pentru microelectroeroziune asistată de ultrasunete, rezultând următoarea configurație:

- Motor pas cu pas în cinci faze pentru obținerea unor pași unghiulari nativi de valoarea mică, care a fost acționat de un driver digital, care comandă micropășirea și care în corelație cu pasul mecanismului șurub-piuliță cu role, asigură un increment liniar de  $0.2 \mu\text{m}$ ;
- Cuplaj elastic de tip burduf, care compensează eventuale necoaxialități între axul motorului și axul șurubului cu role, dar care transmite cuplul de rotație, cu o întârziere compatibilă cu cerințele procesului de microelectroeroziune cu vibrația electrodului-sculă cu frecvență ultrasonică;
- Mecanism șurub-piuliță care conține trei role dispuse pe circumferința șurubului, la unghiuri, care asigură un contact superior role-șurub, prin acțiunea unui sistem de pârghie, care mărește forța de închidere a carcasei care conține rolele, contribuind la creșterea preciziei de poziționare;
- Lăgăruirea fixă într-un capăt al șurubului cu role cu rulment cu contact unghiular cu două rânduri de bile și liberă în capătul opus, printr-o coloană de ghidare lăgăruită cu un rulment liniar (bucșă cu bile crestată); coloana solidară cu piulița este constrânsă să execute doar o mișcare de translație pe verticală, având o suprafața plană în contact cu o rolă de ghidare, a cărei poziție relativă față de coloană se reglează cu ajutorul unui ax excentric pe care este montată rola;
- Sistem de prindere a lanțului ultrasonic folosind prisme, care au contact cu lanțul ultrasonic în zona planului nodal al concentratorului, determinându-se mărimea elongației astfel încât vibrațiile ultrasonice transmise în sistemul de avans să nu afecteze precizia și calitatea suprafeței prelucrate;
- Lanțul ultrasonic care conține un concentrator, cilindric – conic, care are în capătul său electrodul-sculă pentru microprelucrare, poziționat într-un ventru, punct de amplitudine maximă;

Modelarea și simularea funcționării sistemului de avans pentru microelectroeroziune asistată de ultrasunete a relevat următoarele:

- Deformațiile șurubului conducător au valori mai reduse comparativ cu incrementul liniar de poziționare a sistemului de avans de  $0.2 \mu\text{m}$  pentru diverse poziții de funcționare și nu afectează precizia de prelucrare;
- Sistemul de avans funcționează în afara rezonanței pentru că frecvența sa proprie nu se suprapune peste aceea de acționare a motorului pas cu pas;
- Lanțul ultrasonic funcționează în condiții de rezonanță, frecvența transducerului fiind egală cu aceea a concentratorului, care integrează electrodul-sculă.

A fost proiectat procesul tehnologic de realizare a sistemului de avans pentru microelectroeroziune asistată de ultrasunete, după care a fost executat produsul și testat în condiții de laborator – nivelul 4 de maturitate tehnologică (TRL 4). Astfel s-a obținut funcționarea în condiții de rezonanță a lanțului ultrasonic, care integrează scula, condiție *sine qua non* pentru microelectroeroziune asistată de ultrasunete. Sistemul de avans realizează deplasările rapide pentru scoaterea din scurt-circuit sau arc continuu între suprafețele electrodului-sculă și semifabricatului, precum și situația de mers în gol (lipsa descărcărilor electroerozive), asigurându-se astfel stabilitatea procesului de microprelucrare. Timpul de răspuns la deplasările rapide, care se

recomandă a se efectua la o anumită frecvență de acționare a motorului pas cu pas, a cărei valoare redusă este compensată de o strategie de comandă a sistemului de avans implementată pe controlerul de logică programată, care previne degenerarea procesului. Deplasarea se confirmă a fi realizată pe un profil "S" de viteză, care previne șocurile din timpul funcționării și contribuie la realizarea preciziei de poziționare cerute la microelectroeroziune asistată de ultrasunete.

Prin parcurgerea etapelor de cercetare stabilite au fost aduse contribuții la tema de doctorat, *cercetări privind creșterea performanțelor sistemelor de avans pentru microelectroeroziune asistată de ultrasunete*, atât teoretice cât și aplicative, după cum urmează:

### Contribuții teoretice

- Caracterizarea fenomenologică a cavității induse ultrasonic în interstițiul de prelucrare și a influenței acesteia asupra mecanismului de îndepărtare a materialului la microelectroeroziune asistată de ultrasunete;
- Caracterizarea comportamentului sistemului de avans în condițiile asistării cu ultrasunete a microelectroeroziunii;
- Caracterizarea fenomenologică a intrării în rezonanță a sistemului de avans prin suprapunerea frecvenței proprii a sistemului de avans cu frecvența sistemului de comandă a motorului pas cu pas;
- Elaborarea metodologiei de funcționare a sistemului de avans pentru microEDM+US în afara rezonanței - evitarea suprapunerii frecvențelor proprii ale acestuia cu frecvențele de acționare ale motorului pas cu pas la diferite regimuri de funcționare;
- Elaborarea metodologiei de obținere a condiției de rezonanță a lanțului ultrasonic, care integrează electrodul-sculă pentru microgăurire asistată de ultrasunete;
- Elaborarea metodologiei de simulare a deformațiilor șurubului conducător pentru diferite poziții de funcționare ale rolor din cadrul mecanismului de deplasare și poziționare a sistemului de avans.

### Contribuții aplicative

- Proiectarea conceptuală a unui sistem de avans performant pentru microelectroeroziune asistată de ultrasunete la nivelul 2 de maturitate tehnologică, TRL2;
- Aplicarea eficientă a unor metode consacrate, complementare de îmbunătățirea calității care au condus la soluții pentru creșterea performanțelor sistemului de avans pentru microelectroeroziune asistată de ultrasunete;
- Completarea metodei FMEA cu o etapa suplimentară, care se referă la prioritizarea acțiunilor întreprinse pentru prevenirea disfuncțiilor unui produs, în funcție de factorul (numărul) de eficiență economică, determinat prin produsul factorilor de rapiditate a implementării, costul implementării și impactul asupra reducerii riscului asociat disfuncției;
- Proiectarea detaliată a unui sistem de avans performant pentru microelectroeroziune asistată de ultrasunete care a permis realizarea fizică a acestuia și funcționalitatea pentru creșterea performanțelor tehnologice în condițiile unor *costuri reduse de realizare*;
- Proiectarea detaliată a lanțului ultrasonic, care integrează electrodul-sculă pentru microelectroeroziune asistată de ultrasunete, precum și a subansamblului de prindere a acestuia pe sistemul de avans astfel încât să se realizeze funcționarea în condiții de rezonanță și evitarea transmiterii de vibrații ultrasonice în cadrul sistemului tehnologic - capul de lucru al mașinii de microEDM - care să afecteze precizia de prelucrare;
- Modelarea și simularea funcționării sistemului de avans pentru microelectroeroziune asistată de ultrasunete, analizând frecvența proprie și deformațiile acestuia în condiții de funcționare

relevante. S-a asigurat evitarea intrării în rezonanță cu frecvența de acționare a motorului pas cu pas și verificarea deformațiilor care să nu afecteze precizia de prelucrare în condiții de funcționare relevante;

- Modelarea și simularea funcționării unui concentrator ultrasonic, care integrează electrodul-sculă pentru microelectroeroziune asistată de ultrasunete și obținerea condiției *sine qua non* de rezonanță a funcționării lanțului ultrasonic;
- Proiectarea procesului tehnologic de realizare a unui sistem de avans, care să permită creșterea performanțelor tehnologice, respectiv precizie, calitate a suprafeței prelucrate, productivitate și uzură volumetrică relativă;
- Proiectarea procesului tehnologic de realizare a unui lanț ultrasonic, care integrează electrodul-sculă pentru microelectroeroziune asistată de ultrasunete și a subansamblului de prindere pe sistemul de avans și execuția acestora în condiții de funcționare la rezonanță cu generatorul de ultrasunete și fără transmiterea vibrațiilor ultrasonice în dispozitivul de prindere și implicit în sistemul tehnologic microEDM+US care să afecteze precizia de prelucrare;
- Execuția și testarea unui sistem de avans pentru microelectroeroziune asistată de ultrasunete în condiții de laborator – nivelul 4 de maturitate tehnologică, TRL 4 care au confirmat viabilitatea soluțiilor constructive adoptate.

### **Direcții de cercetare viitoare**

După obținerea obiectivelor propuse în cadrul lucrării de doctorat, se deschid următoarele direcții de cercetare, care să conducă la creșterea performanțelor tehnologice ale microelectroeroziunii asistate de ultrasunete:

- Experimentări ale sistemului de avans în condiții de funcționare apropiate de cele reale (TRL 5 și 6), care să confirme modelările și simulările care au condus la realizarea sistemului de avans pentru microEDM+US, testat în condiții de laborator (TRL 4);
- Aprofundarea problematicii deformațiilor dintre șurubul conducător și role pe baza teoriei Mecanicii de contact, folosind metoda elementelor finite și elementelor de frontieră;
- Concepția și realizarea altor tipuri performante de sisteme de avans adecvate pentru microelectroeroziune asistată de ultrasunete cu noi configurații, dispunere a elementelor componente și tip de acționare a șurubului cu role sau bile;
- Realizarea unor sisteme de avans în alte tipuri de bucle: închise și hibride, care permit creșterea preciziei de poziționare, reducerea timpului de răspuns, a incrementului de deplasare și a vibrațiilor din sistem;
- Utilizarea altor tipuri de materiale din care sunt alcătuite elementele componente ale sistemelor de avans, care să determine simplificarea structurii acestora, respectiv o reducere a timpului de răspuns la comenzile de retragere și avans.

## Bibliografie selectivă

- [1] Ghiculescu, L.D., Curs Tehnologii Neconvenționale, Facultatea de Inginerie Industrială și Robotică, Universitatea Națională de Știință și Tehnologie Politehnica București, disponibil la: <https://curs.upb.ro/2023/course/view.php?id=4864>, accesat la: 08.07.2023;
- [2] Chatti, S., Laperriere, L., Reinhart, G., Tolio, T., CIRP Encyclopedia of Production Engineering, Springer (2019), ISBN: 978-3-662-53120-4;
- [3] Ghiculescu L.D., Schulze H. P., Marinescu N., Comparison between gas bubble life duration at classic and ultrasonic aided EDM finishing, Academic Journal of Manufacturing Engineering, 7 (2009) 63-68;
- [4] Schulze H.-P., Wollenberg G., Herms R., Mecke K., Gas bubble morphology in small working gaps at spark erosion, Annual report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 17 (2004) 534 – 537, DOI: [10.1109/CEIDP.2004.1364305](https://doi.org/10.1109/CEIDP.2004.1364305) ;
- [5] Ghiculescu, L.D., Marinescu, N. I., Jitianu, G., Seritan, G., On precision improvement by ultrasonics-aided electrodischarge machining, Estonian Journal of Engineering, pp. 2 – 9, 2009;
- [6] Snoeys, R., Dauw, D. F., Kruth, J. P., Survey of Adaptive Control in Electro Discharge Machining, Journal of Manufacturing Systems, 2 (1983) 147-164, DOI: [10.1016/S0278-6125\(83\)80028-4](https://doi.org/10.1016/S0278-6125(83)80028-4);
- [7] Ghiculescu, L.D., Prelucrări neconvenționale, ISBN: 973-652-975-4, București, 2004;
- [8] Jahan M. P., Micro-Electrical Discharge Machining, Chapter 4 in *Nontraditional Machining Processes*, J. Paulo Davim, editor, Springer (2013), ISBN: 978-1-4471-5179-1;
- [9] Schubert, A., Zeidler, H., Hackert-Oschätzchen, M., Schneider, J., & Hahn, M., Enhancing Micro-EDM using Ultrasonic Vibration and Approaches for Machining of Nonconducting Ceramic, Journal of Mechanical Engineering, 59 (2013) 157-158, DOI: [10.5545/sv-jme.2012.442](https://doi.org/10.5545/sv-jme.2012.442) ;
- [10] Liu, Q., Zhang, Q., Zhang, M., & Zhang, J., Review of size effects in micro electrical discharge machining, Precision Engineering, 44 (2016) 30-31, DOI: [10.1016/j.precisioneng.2016.01.006](https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2016.01.006) ;
- [11] Wong, Y. S., Rahman, M., Lim, H. S., Han, H., Ravi, N., Investigation of micro-EDM material removal characteristics using single RC-pulse discharges, Journal of Materials Processing Technologies, 140 (2003) 303-307, DOI: [10.1016/S0924-0136\(03\)00771-4](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(03)00771-4) ;
- [12] Ghiculescu, L. D., Marinescu, N. I., Nanu, S., Ghiculescu, D., Kakarelidis, G., Finite element method study on machined shape influence at ultrasonic aided and not aided microelectrodischarge machining, Nonconventional Technologies Review, 3 (2011) 33-37;
- [13] Marinescu, N. I., Ghiculescu, L. D., Nanu, S., Ghiculescu, D., Kakarelidis, G., Technological parameters comparatively studied by FEM at classic and ultrasonic aided microelectrodischarge machining, Nonconventional Technologies Review, 3 (2011) 51-56;
- [14] Ghiculescu, L. D., Contribuții privind finisarea prin procedee neconvenționale a suprafețelor active ale matrițelor, Teză de doctorat, Ingineria și managementul sistemelor tehnologice, 1999;
- [15] Ghiculescu, L. D., Inginerie și fabricare asistată de calculator în domeniul prelucrărilor neconvenționale. Îndrumar de laborator, Editura Printech, ISBN 978-606-521-7, 2013;
- [16] Ghiculescu, L. D., Marinescu, N. I., Alupei, O., On Overlapping the Pulses on Cumulative Microjets Stage at Ultrasonically Aided Electrical Discharge Machining, Applied Mechanics and Materials, 834 (2016) 126-131, DOI: [10.4028/www.scientific.net/AMM.834.126](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.834.126) ;

- [17] Endo, T., Tsujimoto, T., Mitsui, K. Study of vibration-assisted micro-EDM – The effect of vibration on machining time and stability of discharge, *Precision Engineering*, 32 (2008) 269 – 277, DOI: [10.1016/j.precisioneng.2007.09.003](https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2007.09.003) ;
- [18] Jameson, E. C., *Electrical Discharge Machining*, Machining Technology Association/SME (2001), ISBN: 0-87263-521-X;
- [19] Ștefănescu, I. I., Chiriță, G., & Milea, F., *Transmisii și Asamblări cu Șuruburi*, Editura Fundației Universitare (2004), ISBN: 973-627-188-9;
- [20] \*\*\*, Proiectarea sistemului de transmitere șurub piuliță cu bile, disponibil la: [https://mec.tuiasi.ro/ro/images/OMM/Cap\\_4\\_Proiectarea\\_TSPB\\_tabele\\_dimens\\_rezemale\\_2015.pdf](https://mec.tuiasi.ro/ro/images/OMM/Cap_4_Proiectarea_TSPB_tabele_dimens_rezemale_2015.pdf) , accesat la: 12.03.2020;
- [21] \*\*\*, Motor pas cu pas CRK564PMBP, disponibil la: [http://www.giden.ru/data/PDF/stepping\\_motors/Oriental\\_motor/crk-catalogue-e.pdf](http://www.giden.ru/data/PDF/stepping_motors/Oriental_motor/crk-catalogue-e.pdf) , accesat la: 12.03.2020;
- [22] Ghiculescu, L.D., *Calitatea proceselor si produselor*, Editura Printech, București, ISBN 978-606-23-0678-6, 2016;
- [23] Mikulak, R. J., McDermott, R., & Beauregard, M., *The basics of FMEA*, CRC Press (2009), ISBN: 978-1-56327-377-3;
- [24] Deopale, C. C., Ghiculescu, L. D., Cristea, B. I., Risk Management in the cement industry-improving the risk assessment outcomes by developing of a new methodology for prioritizing the treatment options, *Acta Technica Napocensis-Series: Applied Mathematics, Mechanics, and Engineering*, 65, 2023;
- [25] \*\*\*, SKF Roller screws, disponibil la: <https://idoc.pub/documents/skf-14489-en-roller-screw-cataloguepdf-wl1px22k9vlj> , accesat la: 12.03.2020;
- [26] \*\*\*, Linear ball bearing, open version, disponibil la: <https://www.skfbearingselect.com/> , accesat la: 12.03.2020;
- [27] \*\*\*, Double row angular contact ball bearing, disponibil la: <https://www.skf.com/group/products/rolling-bearings/ball-bearings/angular-contact-ball-bearings/double-row-angular-contact-ball-bearings/productid-3202%20A-2RS1TN9%20FMT33> , accesat la: 12.03.2020;
- [28] \*\*\*, Linear ball bearing, open version, disponibil la: <https://www.minitec.de/en/products/linearfuehrung/linear-bearings/serie-lme/ball-bushing-lme-20-uu> , accesat la: 12.03.2020;
- [29] Popescu I., Marinescu A., Tonoiu S., Purcărea M., *Scule așchietoare, Dispozitive de prindere a sculelor, dispozitive de prindere a semifabricatelor verificatoare, elemente de proiectare*, Editura MATRIX ROM (2002), ISBN: 973-685-741-7;
- [30] Cristea, B. I., Ghiculescu, L. D., Deopale, C. C., Eigenfrequency simulation for a roller screw used at feed system for ultrasonically aided micro-electrical discharge machining, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 1235, 2022;
- [31] Cristea, B. I., Ghiculescu, L. D., Deopale, C. C., Modeling and simulation of deformations in the feed system for ultrasonically aided micro-edm, *Nonconventional Technologies Review*, 25(3), 2021;
- [32] Radeș, M., *Vibrații mecanice*, Printech (2008), disponibil la: <http://www.rm.upb.ro/wp-content/uploads/2019/01/Rades/05%20M%20Rades%20-%20Vibratii%20mecanice%201.pdf> , accesat la: 12.03.2020 ;

- [33] Ghiculescu, L. D., Ultrasonically Aided EDM in *Electrical Discharge Machining (EDM)*, Jahan, M. P., editor, Nova Publisher (2015), ISBN: 1634835913;
- [34] \*\*\* U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, Technology Readiness Assessment Guide, disponibil la: <https://www.directives.doe.gov/directives-documents/400-series/0413.3-EGuide-04a> , accesat la: 28.06.2021;
- [35] \*\*\* Technology readiness levels (TRL), disponibil la: [https://ec.europa.eu/research/participants/data/ref/h2020/wp/2014\\_2015/annexes/h2020-wp1415-annex-g-trl\\_en.pdf](https://ec.europa.eu/research/participants/data/ref/h2020/wp/2014_2015/annexes/h2020-wp1415-annex-g-trl_en.pdf) , accesat la: 28.06.2021;
- [36] \*\*\* Definiții TRL, disponibil la: [https://uefiscdi.gov.ro/userfiles/file/PNCIDI%20III/P2\\_Cresterea%20competitivitatii%20economiei%20romanesti/TRL.pdf](https://uefiscdi.gov.ro/userfiles/file/PNCIDI%20III/P2_Cresterea%20competitivitatii%20economiei%20romanesti/TRL.pdf) , accesat la: 28.06.2021;
- [37] Jitianu, G., EDMing SERV CONSULT SRL, Metodă și echipament pentru maximizarea numărului coincidențelor momentelor amorsării unor descărcări electroerozive într-un mediu dielectric lichid, supus sonocavitației cu un anumit moment prestabilit al fazelor undei ultrasonice asociate, Romania Patent, 2016, disponibil la: <https://patents.google.com/patent/RO131031B1/ro?q=RO+131031> , accesat la: 01.09.2023;
- [38] Jitianu, G. EDMing SERV CONSULT SRL - Metodă și echipament pentru corelarea descărcărilor electroerozive cu un semnal generator de sonocavitație, RO131211, disponibil la: [https://ro.espacenet.com/publicationDetails/biblio?II=0&ND=3&adjacent=true&locale=ro\\_RO&FT=D&date=20160630&CC=RO&NR=131211A2&KC=A2](https://ro.espacenet.com/publicationDetails/biblio?II=0&ND=3&adjacent=true&locale=ro_RO&FT=D&date=20160630&CC=RO&NR=131211A2&KC=A2) , accesat la 01.09.23;
- [39] Cristea B. I., Ghiculescu L. D., Țițu, A. M., Deopale C. C., Modeling and simulation of an ultrasonic concentrator used in a feed system for ultrasonically aided microedm, Publicat de ACTA Technica Napocensis series-applied mathematics mechanics and engineering Journal, în curs de publicare (2023);

## Anexa 1 – Lucrări publicate

### A. Indexat ISI

A.1 **Cristea B. I.**, Ghiculescu L. D., Țițu, A. M., Deopale C. C., *Modeling and simulation of an ultrasonic concentrator used in a feed system for ultrasonically aided microedm*, Prezentat la The 22<sup>nd</sup> International Conference of Nonconventional Technologies (ICNcT) 2023, Publicat de ACTA Technica Napocensis series-applied mathematics mechanics and engineering Journal, în curs de publicare (2023);

A.2. Deopale C. C., Ghiculescu L. D., **Cristea B. I.**, *Industry 4.0 in Romania - a practical analysis of the country potential from economic and human resources perspective to support a sustainable development of cement smart factories*, Prezentat la QIEM-ICNcT Conference 2021, Publicat de ACTA Technica Napocensis series-applied mathematics mechanics and engineering Journal, Volumul 64, Numărul 4, 663-674, WOS: 000740057300012 (2022);

A.3. Deopale C. C., Ghiculescu L. D., **Cristea B. I.**, *Risk management in the cement industry - improving the risk assessment outcomes by developing of a new methodology for prioritizing the treatment options*, Prezentat la Innovative Manufacturing Engineering & Energy Conference (IManEE) 2022, Publicat de ACTA Technica Napocensis series-applied mathematics mechanics and engineering Journal, Volumul 65, Numărul 4, 1095-1102, WOS: 000969679100015 (2023).

### B. Indexat BDI

B.1. **Cristea B. I.**, Ghiculescu L. D., Deopale C. C., *Modeling and simulation of deformations in the feed system for ultrasonically aided micro-edm*, Nonconventional Technologies Review, Volumul 25, Numărul 3, 54-60, Publicat de **ProQuest**, disponibil la: <https://www.proquest.com/docview/2638774059?pq-origsite=gscholar&fromopenview=true&sourcetype=Scholarly%20Journals> (2021);

B.2. **Cristea B. I.**, Ghiculescu L. D., Deopale C. C., *Eigenfrequency simulation for a roller screw used at feed system for ultrasonically aided micro-electrical discharge machining*, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volumul 1235, Publicat de **ProQuest**, DOI: 10.1088/1757-899X/1235/1/012047 (2022);

B.3. **Cristea B. I.**, Ghiculescu L. D., Dumitru M., *Thermal and Mechanical Influence of Ultrasonically Aided Electrical Discharge Machining on Co-Cr Alloys*, Advanced Materials Research, Volumul 1157, 93 – 107, Publicat de **Scientific.Net**, DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1157.93 (2020);

B.4. **Cristea B. I.**, Ghiculescu L. D., *Methods for design Improvement of feed system for ultrasonically aided micro-electrical discharge machining*, 36<sup>th</sup> IBIMA Conference: 4-5 November 2020, Granada, Spain, ISBN: 978-0-9998551-5-7, disponibil la: <https://www.youtube.com/watch?v=0BcRmXfftyk&t>, accesat la: 01.01.2024;

B.5. **Cristea B. I.**, Ghiculescu L. D., *Some technological solutions for ultrasonic aiding of micro-electrical discharge machining*, Revista de Tehnologii Neconvenționale, Volumul 23, Numărul 4, 88 – 94, Publicat de **ProQuest**, disponibil la: <https://www.proquest.com/scholarly-journals/some-technological-solutions-ultrasonic-aiding/docview/2362896050/se-2>, (2019);