

SISTEM DE AVANS PENTRU MICROPRELUCRĂRI ELECTROCHIMICE

FEED SYSTEM FOR ELECTROCHEMICAL MICROPROCESSING

TÎRTEA Bogdan-Alexandru, BUZEA Silviu-Petrișor

Facultatea: IIR, Specializarea: INPN, Anul de studii: I, e-mail: bogdantirtea@yahoo.com

Conducător științific: Prof. Dr. Ing. **Daniel GHICULESCU**

ABSTRACT: This paper presents a new and innovative industrial product for the micro-electrochemical machining sector. It represents a feed system for the tool electrode with the possibility of moving on the vertical axis with a minimum value of $\Delta = 0,2 \mu\text{m}$. This value was gathered after extensive search in the industry, to find its main demands for precision micromachining, and also by analyzing the current state of this sector along with a few competitors. This product addresses small enterprises specialized in the micromachining domain who use these technologies to produce special pieces for the most demanding industries, including aerospace, military, medical and so on. This sector is a very competitive one, because often times these small companies sell their products to bigger companies who need those pieces, like the airplane makers, who often externalize such production. This is why products like the one presented in this paper are very important for these small businesses, who have to meet expectations but also keep the costs to a minimum.

CUVINTE CHEIE: ECM – prelucrări electrochimice; μECM – microprelucrări electrochimice.

1. Introducere

De-a lungul timpului, în domeniul tehnologic, s-a manifestat o continuă micșorare a dimensiunilor produselor obținute datorită nevoilor de miniaturizare din diversele industrii aferente, precum industria aerospațială, auto, militară, medicală și bijuterii. Aceste industrii au beneficiat foarte mult datorită noilor tehnologii bazate pe utilizarea unor piese mai mici, mai ușoare, mai compacte și, implicit, mai performante.

Obținerea acestor piese se face prin așa-numitele microprelucrări. Acestea reprezintă variante ale procedeelor deja existente, precum prelucrarea cu laser, electroeroziune, electrochimie. Toate acestea au fost implementate deja cu succes în industria aerospațială, datorită avantajelor considerabile precum uzura redusă sau inexistentă a sculei, precizia foarte bună de prelucrare, rugozitatea foarte mică obținută, productivitatea la nivel industrial și faptul că duritatea piesei nu contează. Dintre acestea, prelucrările electrochimice se remarcă în mod special datorită faptului că nu formează microfisuri la nivelul suprafeței prelucrate, ceea ce le conferă un avantaj foarte important în dezvoltarea lor în viitor și explică ponderea lor ridicată de folosire în industria aerospațială și auto. [1]

Prelucrarea electrochimică, a fost propusă pentru prima dată în 1929 de către V.N.Gusseff, care în invenția sa brevetată în Marea Britanie, enunță diferite particularități ale procedurii, aproape identice cu procesul în etapa lui actuală de dezvoltare. Cu toate avantajele evidente ale acestui procedeu, a fost nevoie de aproape 20 ani ca dezvoltarea tehnică să-l impună ca metodă de prelucrare și să-i asigure – în multe cazuri – prioritatea în raport cu metodele clasice. [2]

Datorită preciziei slabe obținute în raport cu alte procedee de prelucrare și a poluării excesive, ECM a fost oarecum ignorat în anii '90, dar după descoperirea variantei la nivel micro la începutul anilor 2000, ECM a devenit din nou o tehnologie relevantă și s-au dezvoltat de asemenea și alte variante ale procedurii, mai eficiente, care au ridicat considerabil utilizarea acestei tehnologii. Aceste noi variante includ asistarea cu ultrasunete, detoxifierea electrolitului precum și prelucrarea cu jet de electrolit. [3]

În prezent, cel puțin 50-60 % din totalul pieselor pentru aeronave, rachete sunt realizate prin ECM și diverse variante ale acesteia, iar 70% din piesele care intră în componența sateliților artificiali și a aparatelor interplanetare sunt realizate numai prin aceste tehnologii. [2]

2. Stadiul actual

Odată cu dezvoltarea sistemelor micro-electro-mecanice (MEMS), microprelucrările au ajuns să fie un domeniu din ce în ce mai important. Structurile metalice miniaturizate au o folosire foarte diversă în multe industrii importante, precum cea aerospațială, militară, medicină etc. Unul dintre procedeele de microprelucrare ce a cunoscut o utilizare din ce în ce mai mare odată cu descoperirea sa este reprezentat de microprelucrarea electrochimică (μ ECM).

Acest procedeu prezintă numeroase avantaje, precum inexistența uzurii sculei, nedependența de duritatea piesei, precizia foarte bună de prelucrare și, în special, lipsa microfisurilor lăsate pe piesă în urma prelucrării. Datorită acestor avantaje, s-a pus accent pe acest procedeu în cercetare-dezvoltare, atât pe tehnologie, cât și pe echipamentul respectiv. Un astfel de echipament de μ ECM este prezentat în figura 1. [5,6]

Acesta reprezintă un echipament tipic de μ ECM, cu toate componentele aferente, cum ar fi sursa de curent pulsatoriu, sistemul de pompare al electrolitului și sistemul de avans al electrodului-sculă.

Una dintre principalele provocări ale procesului de μ ECM este reprezentată de menținerea constantă a valorii interstițiului de prelucrare. Din tabelul 1 se poate observa o scădere considerabilă a interstițiului de prelucrare odată cu trecerea la μ ECM, ceea ce conduce implicit la modificarea unei componente a instalației pentru a menține constant interstițiul de prelucrare cu valorile cerute.

Componenta la care se face referire este reprezentată de sistemul de avans al electrodului-sculă. Acesta se ocupă cu gestionarea interstițiului de lucru și reprezintă un ansamblu de mai multe piese, fiecare cu un anumit rol și cu o anumită funcție îndeplinită, detaliate.

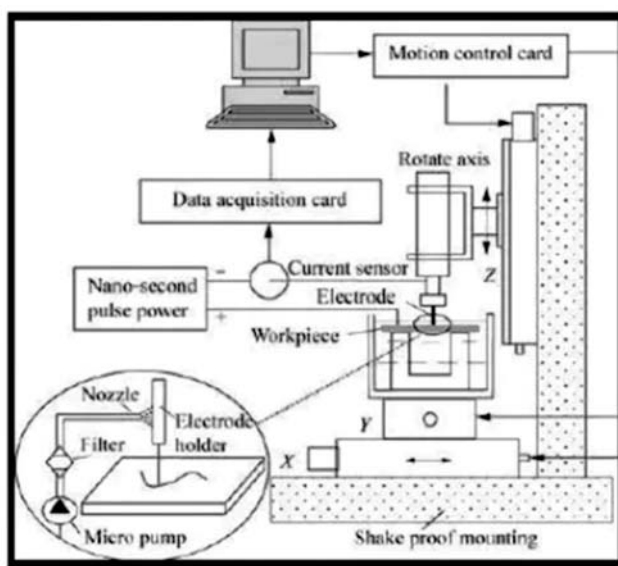


Fig. 1. Schema unui sistem de μ ECM [6]

3. Marketing strategic al produsului

Acest sector al microprelucrărilor este unul foarte competitiv, întrucât este compus din întreprinderi mici și mijlocii, specializate pe un anumit tip de piese obținute sau pe un anumit tip de tehnologie folosită, care realizează produse destinate în principal multinaționalelor din industria aerospațială. Acestea trebuie să practice o îmbunătățire continuă a calității pieselor dar și a proceselor utilizate, menținând în același timp costurile la un nivel cât mai mic. Prelucrarea electrochimică și varianta sa micro reprezintă o tehnologie care oferă aceste posibilități acestor firme, de aceea având o pondere mare în principalele industrii precum cea aerospațială.

3.1 Identificarea clienților

Pe baza unei analize a pieței, s-au determinat clienții țintă ai produsului sistem de avans pentru microprelucrări electrochimice. Aceștia sunt reprezentați de firme mici, clasificate ca IMM-uri, localizate

în România și specializate în diverse industrii (aerospațială, ștanțe și matrițe, militară, medicală, auto etc.). Motivul principal pentru determinarea acestor firme ca potențiali clienți este reprezentat de specializarea lor în microprelucrări în industriile principale specifice μ ECM. Tabelul 1 prezintă detaliile acestor firme, precum adresa lor și industria pe care sunt specializate fiecare.

Tabel 1. Lista clienților țintă

Nr. Crt.	Denumire	Adresă	Industrie
1	Fermit Ștanțe și Matrițe	Aleea Industriei, Nr. 1, Râmnicu Sărat	Ștanțe și matrițe
2	ICTCM SA	Șoseaua Olteniței, Nr. 103, Sector 4, București	Cercetare și dezvoltare
3	Electroprecizia automotive equipment SRL	Strada Parcului, Nr. 18, Săcele	Auto
4	Biotechnik SRL	Strada Transilvaniei, Nr. 14B, Cismădic	Medicală
5	West Metal SRL	Str. Aurel Păunescu-Podeanu, Nr. 146A, Timișoara	Aeronautică, auto
6	LasPin Technology	Str. Garoafei, Nr. 1A, Sector 5, București	Aeronautică

3.2. Date despre produse concurente

Produsele concurente de pe piață sunt reprezentate de echipamente, instalații de prelucrare prin μ ECM, cu referire la sistemul de avans al electrodului sculă. Produsele concurente cât și specificațiile acestora sunt dispuse în tabelul 2. [7,8,9]

Tabelul 2. Lista produselor concurente

Nr. Crt.	Firma producătoare	Denumire, model echipament	Deplasarea minimă pe axa Z, Δ [μ m]
1	INDEC	Mașină de ECM Bet8000-2D	2
2	EMAG	Mașină de μ ECM PO 900 BF	0,5
3	PEMTec	Mașină de μ ECM PEM 800 S	0,2

Pentru sistemul de avans cea mai importantă specificație este valoarea deplasării minime pe axa Z a electrodului sculă. Aceasta este o caracteristică de tipul “smaller the better”, cu cât mai mică cu atât mai bine. Din analiza competitorilor, rezultă că pentru a fi competitiv pe piață și a aduce în același timp o inovare, valoarea acestei deplasări trebuie să fie de $\Delta = 0,2 \mu\text{m}$.

4. Proiectarea conceptuală

În cadrul acestui capitol este evidențiat algoritmul parcurs pentru a ajunge în final la un concept optim de produs, care să atingă obiectivul principal, ci anume deplasarea $\Delta = 0,2 \mu\text{m}$.

4.1 Analiza funcțiilor produsului

Funcțiile produsului sunt de mai multe feluri, de la funcția generală, care este formată din mai multe funcții principale, care la rândul lor determină mai multe funcții secundare. Deoarece sistemul de avans este un produs industrial, funcțiile sale s-au determinat în funcție de cerințele acelor industrii.

Funcția generală reprezintă ansamblul însușirilor produsului pentru satisfacerea cerințelor respective. Pentru sistemul de avans, funcția generală este de a menține interstițiul de prelucrare la o valoare optimă, precizată în funcție de cerințele procesului de μ ECM.

Funcțiile principale reprezintă însușiri ale sistemului de avans ce determină funcția lui generală.

Funcțiile secundare reprezintă interacțiunile dintre funcțiile principale între ele, caz în care se numesc interacțiuni interne sau cu mediul înconjurător, caz în care se numesc interacțiuni externe. Tabelul 3 prezintă toate aceste funcții.

Tabelul 3. Funcțiile produsului

Nr. Crt.	Funcții primare	Funcții secundare
1	Deplasarea incrementală pe verticală a electrodului sculă	<ul style="list-style-type: none"> • Montarea motorului; • Strângerea șuruburilor motorului; • Montarea cuplajului elastic;

Nr. Crt.	Funcții primare	Funcții secundare
		<ul style="list-style-type: none"> • Montarea șurubului conducător; • Montarea lagărului; • Montarea coloanei.
2	Ghidarea coloanei pe verticală	<ul style="list-style-type: none"> • Montarea carcasei bușei; • Strângerea șuruburilor; • Fixarea bușei cu bile.
3	Transformarea mișcării de rotație în mișcare de translație	<ul style="list-style-type: none"> • Montarea șurubului cu bile/role.
4	Preluarea rotației coloanei	<ul style="list-style-type: none"> • Montarea axului rolei; • Montarea suportilor rolei de urmărire; • Fixarea rolei de urmărire.
5	Reglarea perpendicularității	<ul style="list-style-type: none"> • Verificarea perpendicularității coloanei cu un comparator cu palpator; • Ajustarea coloanei.
6	Reglarea înclinării	<ul style="list-style-type: none"> • Desfacerea șuruburilor pentru reglarea înclinării; • Rotirea suportului în poziția dorită; • Strângerea șuruburilor pentru reglarea înclinării.
7	Reglarea pe verticală	<ul style="list-style-type: none"> • Desfacerea șuruburilor pentru reglarea pe verticală; • Deplasarea suportului pe verticală; • Strângerea șuruburilor.
8	Divizarea incrementului unghiular al motorului	<ul style="list-style-type: none"> • Montarea driverului digital al motorului.
9	Prinderea electrodului sculă	<ul style="list-style-type: none"> • Fixarea electrodului sculă în mandrină/bușă elastică.
10	Prinderea întregului sistem de avans	<ul style="list-style-type: none"> • Așezarea pieselor pe găurile șuruburilor suportului sistemului de avans; • Strângerea șuruburilor.
11	Prinderea pe suportul care se va așeza pe canalele T ale mașinii-unelte	<ul style="list-style-type: none"> • Alinierea găurilor suportului sistemului de avans cu găurile suportului mașinii; • Strângerea șuruburilor.
12	Realizarea prelucrărilor μ ECM	<ul style="list-style-type: none"> • Așezarea suportului pe canalele T ale mașinii-unelte; • Strângerea șuruburilor.

S-au stabilit, de asemenea, funcțiile critice, cele responsabile de succesul comercial al produsului și care rezultă din cerințele de importanță maximă ale industriilor, în cazul nostru fiind vorba de funcțiile 1,5,6,7,8,12.

4.2 Fenomene care stau la baza procesului de μ ECM

ECM este utilizată numai la prelucrarea metalelor și aliajelor și are la bază fenomenul de dizolvare anodică, ce este însoțit de reacțiile chimice de electroliză dintre piesă și electrodul utilizat. [2]

Acest ansamblu determinat de piesă, electrodul sculă și mediul de lucru – electrolitul – precum și sursa de curent se numește celulă electrolitică 1 – fig. 2. [10]

În spațiul dintre anod (piesa, 8) și catod (electrodul sculă, 3) de prelucrare (interstițiul de prelucrare – s), au loc fenomenele care stau la baza legilor electrolizei, datorită trecerii curentului prin electrolit 2. Sub acțiunea tensiunii electrice U din interstițiu ia naștere un câmp electric E dirijat de la anod spre catod. Intensitatea câmpului electric se determină cu relația (1):

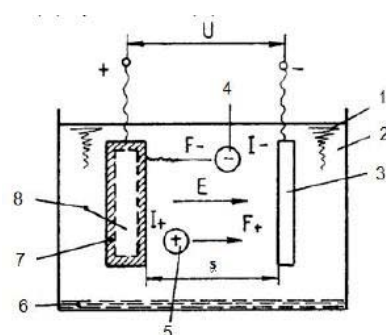


Fig. 2. Schema generală a procesului ECM [2]

$$E = U/s \quad (1)$$

Ionii pozitivi 5 și negativi 4, existenți în electrolit, sunt acționați de forțele electrostatice și dirijați spre polii de semn contrar ionului. La anod, ionii negativi 4 ai electrodului sculă (catodului), întâlnesc ionii pozitivi ai sculei și se formează un strat pasivizat (neutru electric). Acesta se îndepărtează pentru a continua prelucrarea (depasivizare). Această depasivizare se poate realiza în 3 moduri: *natural*, atunci când stratul este îndepărtat cu ajutorul forțelor rezultate din degajările de gaze sau este dizolvat în electrolit; *hidrodinamic*, cu ajutorul presiunii electrolitului (peste 20 atm); abraziv, de către particulele abrazive ale sculei, caz specific la ECM abraziv.

În domeniul tensiunilor aplicate la ECM, care sunt mai mici de 30V (tabelul 5), se respectă legile lui Faraday (legile electrolizei). La tensiuni mai mari, acestea nu se mai respectă și se intră într-o altă ramură a procesului, ci anume ECM cu tensiuni înalte.

Unul dintre cei mai importanți parametri este reprezentat de interstițiul de prelucrare. Acesta se determină cu următoarea relație:

$$s_{min} = \frac{(U-\Delta U)M\kappa}{F\rho_p v_f} \quad (2)$$

unde: U este tensiunea [V]; ΔU - căderea de tensiune din interstițiu [V]; M - echivalentul chimic al materialului de prelucrat [g]; κ este conductivitatea electrică a electrolitului [$(\Omega \text{ cm})^{-1}$]; F - numărul lui Faraday (26,8 Ah); ρ_p este densitatea materialului piesei [g/cm^3]; v_f este viteza de avans a electrodului sculă [mm/min].

Procesul de microprelucrare electrochimică – μECM , este o tehnică nouă care reprezintă practic ECM la nivel micro, adică un ECM cu un control mai strict asupra parametrilor de lucru și cu scule mai speciale. Tabelul 4 prezintă diferențele între parametrii de proces utilizați la ECM și μECM .

Tabelul 4. Parametrii ECM vs μECM [4]

Parametrii	ECM	μECM
Tensiunea	10 – 30 V	< 10 V
Intensitatea curentului	150 – 10000 A	< 1 A
Densitatea curentului	20 – 200 A/cm ²	75 – 100 A/cm ²
Tipul curentului folosit	Curent continuu	Curent pulsatoriu
Frecvența	în intervalul Hz – kHz	în intervalul kHz – MHz
Debitul de electrolit	10 – 60 m/s	< 3 m/s
Tipul de electrolit	Soluție de sare	Sare naturală sau acid diluat
Temperatura electrolitului	24 – 65 °C	37 – 50 °C
Concentrația electrolitului	> 20 g/l	< 20 g/l
Mărimea sculei	Mare spre medie	Micro
Interstițiul de prelucrare	100 – 600 μm	5 – 50 μm
Rata de îndepărtare a materialului	0,2 – 10 mm/min	5 $\mu\text{m}/\text{min}$
Mărimea interstițiului lateral	> 20 μm	< 10 μm
Precizia de prelucrare	0,1 mm	0,02 – 0,1 mm
Rugozitatea obținută	0,1 – 1,5 μm	0,05 – 0,4 μm
Toxicitate	Ridicată	Moderată

Principalele diferențe sunt:

- Cantitatea de curent impus, care este mult mai mică la μECM , datorită raportării la nivel micro;
- Tipul curentului folosit. Față de ECM, se utilizează obligatoriu curent pulsatoriu deoarece, în condițiile procesului la nivel micro, utilizarea curentului continuu ar conduce la fierberea electrolitului, fapt ce ar face imposibilă prelucrarea, deoarece electrolitul are un rol foarte important de a îndepărta adaosul de prelucrare transformat prin dizolvare anodică în compuși chimici;
- Rugozitatea obținută la nivel micro este foarte bună – 0,05 – 0,4 μm ;
- Mărimea interstițiului de prelucrare, care este de 10 ori mai mic la μECM . Sistemul de avans trebuie să fie capabil să gestioneze valori ale interstițiului de prelucrare în intervalul 5-50 μm .

Procedul μECM este destinat fabricării pieselor cu cerințe ridicate de precizie, în principal, din industria aerospațială. Aici mai există ca procedee electroeroziunea și prelucrările cu laser, toate optimizate la nivel micro. Dintre acestea, μECM are ponderea cea mai mare de utilizare și are prioritate în cercetare-

dezvoltare, datorită unui avantaj foarte important pentru această industrie foarte pretențioasă, ci anume faptul că nu produce microfisuri la nivel micro, deoarece materialul nu fierbe ca la electroeroziune și laser, ci este îndepărtat de electrolit după dizolvarea anodică. [1]

În concluzie, principalele fenomene care intervin în funcționarea sistemului de avans sunt cele legate de ECM, ci anume fenomenele electrochimice de electroliză, dar și alte fenomene uzuale care intervin în celelalte funcții de deplasare, respectiv montare și reglare a anumitor componente. Aceste fenomene sunt reprezentate de forța gravitațională, ce afectează direct deplasarea pe verticală, precum și orice montaj al unei piese deoarece tot sistemul este vertical, echilibrul de forțe ce afectează diversele reglaje de înclinare și pe verticală și frecarea, care influențează montarea diverselor componente, precum șurubul conducător, coloana în bușă cu bile etc.

4.3 Cercetare externă

Pentru a găsi diverse soluții conceptuale, s-au cercetat diverse brevete/invenții înregistrate de-a lungul timpului.

Brevet CN102513626A – Hao Tong, Long Zhang, Yong Li, China, 2012 – figura 3. [11]

Invenția se referă la un sistem de avans pentru micro-electroeroziune cu fir, care conține un sistem complet electronic cu funcție de control a poziției unghiului circumferențial al microelectrodului, rotația completă cu viteză variabilă și avansul astfel încât să permită integrarea pe o linie de fabricație. Sistemul are în componența sa un motor pas cu pas 5, conectat la driverul digital 33, care face posibilă ajustarea în timp real a poziției microelectrodului. Design-ul compat al dispozitivului de prindere al microelectrodului sculă și sistemul de ghidare al acestuia reduce distanța față de piesă, ceea ce duce la o utilizare mai mare a părții electrodului destinată prelucrării, adică o utilizare mai eficientă, deci costuri reduse cu materialul sculei. Motorul pas cu pas este rotit cu 90 grade în direcția opusă dispozitivului de prindere al microelectrodului sculă, ceea ce-l face pe acesta să se deschidă, nemaifiind nevoie de un driver electric în interior. De asemenea, rezolvă problema dispozitivului de prindere al electrodului sculă, care dacă ar fi fost închis permanent necesita să fie confecționat din plumb pentru conductivitatea electrică la driverul respectiv. Astfel, se elimină nevoia de plumb ca material al dispozitivului de prindere al microelectrodului, ceea ce duce la o fiabilitate mai bună a mecanismului.

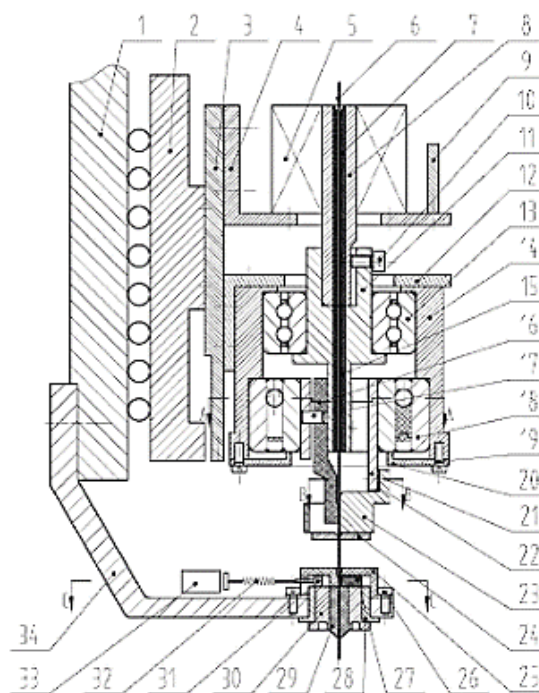


Fig. 3. Brevet CN102513626A [11]

De asemenea, rezolvă problema dispozitivului de prindere al electrodului sculă, care dacă ar fi fost închis permanent necesita să fie confecționat din plumb pentru conductivitatea electrică la driverul respectiv. Astfel, se elimină nevoia de plumb ca material al dispozitivului de prindere al microelectrodului, ceea ce duce la o fiabilitate mai bună a mecanismului.

4.4 Cercetare internă

Folosind diverse metode de stimulare a creativității, au fost identificate diverse concepte de grup, dispuse în tabelul 5. Pentru fiecare funcție aplicabilă, s-a identificat cel puțin o soluție tehnologică. Pentru 3 funcții, cea de deplasare pe verticală incrementală s-au identificat 2 tipuri de motoare, pentru funcția de transformare a mișcării de rotație a motorului în mișcare de translație s-au identificat 2 tipuri de șuruburi, iar pentru prinderea electrodului sculă s-au identificat 2 soluții tehnologice.

Tabelul 5. Concepte de grup [12,13]

Nr. Crt.	Funcții	Soluții tehnologice
1	Deplasarea incrementală pe verticală a electrodului-sculă	A1: Motor pas cu pas
		A2: Motor de curent continuu
		Coloană

Nr. Crt.	Funcții	Soluții tehnologice
2	Ghidarea coloanei	Bucșă cu bile
3	Transformarea mișcării de rotație în mișcare de translație	B1: Șurub cu bile și flanșă B2: Șurub cu role
4	Reglarea poziției sistemului de avans (înclinare, verticală)	Șuruburi
5	Divizarea incrementului unghiular al motorului	Driver digital
6	Prinderea electrodului sculă	C1: Mandrină C2: Bucșă elastică
7	Prinderea sistemului de avans	Suport sistem de avans
8	Realizarea prelucrărilor μ ECM	Suport pentru prinderea sistemului de avans pe canalele T ale mașinii-unelte

În afară de aceste soluții tehnologice, au fost identificate inițial și alte soluții constructive simple pentru celalalte funcții:

- lagăr cu rulment și piuliță pentru fixarea șurubului conducător;
- carcasă pentru bucșa cu bile pentru fixarea acesteia;
- rola de urmărire pentru preluarea rotației coloanei;
- suporturi pentru rola de urmărire;
- șuruburi pentru fixarea motorului.

Cu ajutorul conceptelor de grup identificate, s-au construit conceptele individuale. S-au identificat 8 concepte, 4 cu motor pas cu pas și 4 cu motor de curent continuu.

Fiecărui concept individual găsit i se adaugă restul de soluții tehnologice găsite pentru cazurile în care numai o singură soluție tehnologică a fost găsită pentru funcția respectivă.

Pentru obținerea conceptului optim, din fiecare categorie s-a ales câte o soluție tehnologică, având în vedere următoarele observații:

- Motorul nu poate fi sub nicio formă de tip curent continuu, deoarece acest tip de curent, atunci când este folosit la μ ECM, determină fierberea electrolitului și implicit imposibilitatea de prelucrare. Motorul pas cu pas funcționează pe curent pulsatoriu, ideal pentru μ ECM. De asemenea, precizia μ ECM necesită precizia unui motor pas cu pas, realizând $\Delta = \varphi \times p / (n \times 360^\circ) = 0,2 \mu\text{m}$;
- unde: φ = incrementul unghiular al motorului pas cu pas $0,36^\circ$, $n = 10.000$ de incremenți în care driverul digital împarte acel increment unghiular al motorului pas cu pas, iar p este pasul șurubului cu bile [mm]. Rezultă valoarea de $\Delta = 0,2 \mu\text{m}$, conform obiectivului proiectării.
- Tipul șurubului conducător nu contează foarte mult, ambele putând îndeplini cu succes rolul respectiv. În această situație, s-a ales varianta cea mai ieftină și simplă tehnologic, ci anume șurubul cu bile;
- Bucșa elastică a fost ales drept dispozitiv de prindere al electrodului sculă, datorită dimensiunilor compacte, potrivite pentru sistemul de avans.

În concluzie, conceptul optim determinat este A1 – B1 – C2, ci anume conceptul ce cuprinde motorul pas cu pas, șurubul cu bile, bucșa elastică și restul componentelor menționate mai sus.

5. Proiectarea detaliată

Conceptul optim proiectat este prezentat în figura 7. Motorul pas cu pas (1) creează mișcarea de rotație, aceasta fiind transmisă prin axul motorului către cuplajul elastic (3). În cuplajul elastic (3), se introduce într-o intrare axul motorului, iar în cealaltă șurubul cu bile (5). Șurubul cu bile (5) este susținut și ghidat de lagărul (4). Șurubul cu bile (5) transformă mișcarea de rotație a motorului în mișcare de translație, cu ajutorul piuliței (6). Piulița (6) se assemblează cu coloana (7), aceasta trimite mișcarea de translație spre bucșa elastică (10). Coloana (7) este ghidată de bucșa crestată (9). Mișcarea de rotație a coloanei (7) este restricționată de către rola de urmărire (8). Componentele (1), (4), (9), se assemblează pe suportul sistemului de avans (2). Suportul sistemului de avans (2) se assemblează pe suportul de prindere pe canalele T ale mesei mașinii (11).

6. Concluzii și cercetări viitoare

- Microprelucrările electrochimice sunt tehnologii neconvenționale de o importanță deosebită în industria aerospațială, unde majoritatea pieselor sunt realizate prin această tehnologie, capabilă de o precizie foarte bună de prelucrare, fără să creeze microfisuri precum alte procedee ca microelectroeroziune sau microprelucrările cu laser;

- S-au realizat atât cercetări externe, cât și interne pentru găsirea de soluții tehnologice potrivite produsului sistem de avans;

- S-a obținut în final un concept optim, care îndeplinește obiectivul proiectului cu valoarea $\Delta = 0,2 \mu\text{m}$, iar acesta a fost ulterior proiectat detaliat.

Cercetările viitoare se vor axa pe analiza economică și realizarea unui prototip.

7. Bibliografie

- [1] - B. Bhattacharyya et al., "Electrochemical machining: new possibilities for micromachining". Robotics and Computer Integrated Manufacturing 18, pag. 283–289, 2002;
- [2] - Marinescu, N.I, Ghiculescu, D., Tehnologii de prelucrare electrochimică și procedee conexe. Tratat, 562 pagini, Editura Printech, ISBN 973-718-380-0, București, 2005;
- [3] Natsu W., *Micro Electrochemical Machining*, „Micro and Nano Fabrication Technology”. ISBN 978-981-13-0098-1, pag. 807 – 855, 2018.
- [4] - Bhattacharyya .B and Munda .J, “Experimental investigation on the influence of electrochemical machining parameters on machining rate and accuracy in micromachining domain”, International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol.43, pp.1301-1310, 2003.
- [5] Chithirai Pon Selvan et al., „Review of Current State of Research and Development in Electrochemical Machining”, American International Journal of Research in Science, Technology, Engineering & Mathematics, 19(1), ISSN 2328-3580, pp. 14-26, June-August, 2017.
- [6] Di, Z., Yong, L. and et. al. (2010) 'Experimental Investigation on Complex Structures Machining by Electrochemical Micromachining Technology.' Chinese Journal of Aeronautics 23, 578-584.
- [7] <http://www.indec-ecm.com/en/equipment/xet/%C5%D28000-2D/> - compania INDEC, accesat la data de 06.05.2020.
- [8] <https://www.emag.com/machines/ecm-pecm-machines/po-900-bf.html> - compania EMAG, accesat la data de 06.05.2020.
- [9] <https://pemtec.de/en/machines/pem-800s> – compania PEMTec, accesat la data de 06.05.2020.
- [10] Daniel Ghiculescu, Curs Tehnologii Neconvenționale, 2017-2018.
- [11] Hao Tong, Long Zhang, Yong Li, Brevet CN102513626A, China, 2012.
- [12] <http://www.directindustry.com/> - bancă de date pentru soluțiile tehnologice, accesat la 07.05.2020.
- [13] <https://www.hennlich.ro/produse/ghidaje-liniare-cu-bile-bucse-axe-bucse-cu-bile-bucse-cu-bile-standard-2963/tip-lme.html> – bușe cu bile tip LME, accesat la 07.05.2020.

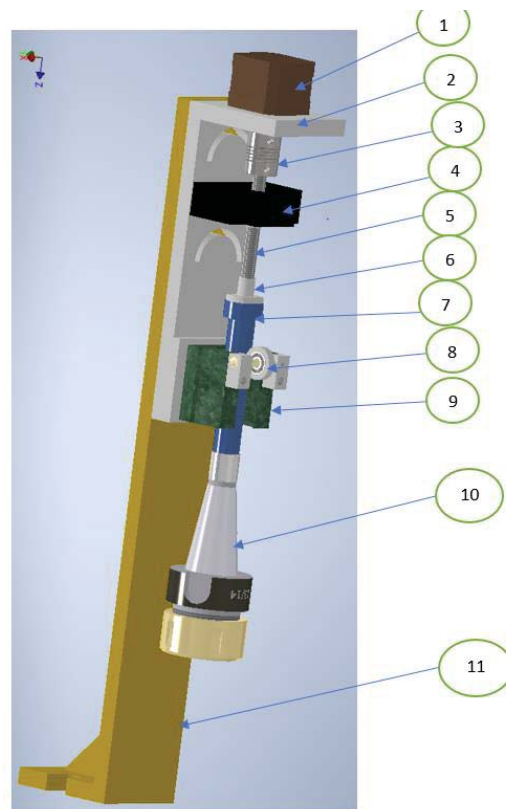


Figura 7. Proiectarea detaliată a conceptului optim