

# SISTEME DE CONTROL ACTIV PENTRU MAȘINI-UNELTE CU COMANDĂ NUMERICĂ

PORIM Mihail<sup>1</sup>, TUDORIE Cătălin-Adrian<sup>1</sup>

Conducător științific: Prof. dr. ing. Constantin DOGARIU

**REZUMAT:** Mașinile-unelte cu comandă numerică sunt caracterizate de precizia ridicată, de multe ori aceasta fiind de ordinul micronilor, sau zecimilor de micron. Pentru atingerea unor astfel de precizii, se impun tehnici noi de realizare și de control pentru toate subansamblurile mașinii. În această lucrare vor fi prezentate o parte a rezultatelor cercetărilor realizate de colectivul de autori privind controlul activ al arborilor principali de înaltă turație, arbori lăgăruți cu lagăre aerostatice cu control activ. Pornind de la un model cu lagăre aerostatice cu geometrie fixă, au fost realizate mai multe studii pentru optimizarea formei lagărelor, propunând o soluție cu lagăre cu geometrie variabilă cu ajutorul unor actuatoare piezoelectrice.

**CUVINTE CHEIE:** arbori principali, lagăre aerostatice, control activ

## 1. INTRODUCERE

Controlul activ pentru mașinile-unelte cu comandă numerică se utilizează pentru creșterea preciziei de lucru acționând, de regulă, în zona de lucru piesă-sculă. Cel mai frecvent sunt supuși controlului activ arborii principali, dispozitivele de prindere a pieselor și suportii port-sculă. Majoritatea cercetărilor întreprinse până în prezent au avut în vedere controlul poziției arborelui principal prin introducerea unor forțe în lagărele arborelui. Mărimea și orientarea forțelor de control a poziției lagărelor sunt date de tractoare de poziție care dau semnal unui controler care prin intermediul unor elemente de execuție (actuatoare) modifică poziția sau forma lagărului care va influența orientarea axei arborelui principal. Creșterea vitezelor de lucru pentru mașinile-unelte a condus la căutarea unor soluții neconvenționale de lăgăruire. Lagărele cu elemente de contact (rulmenții) au limitele lor la turații foarte ridicate ale arborilor. De aceea, lagărele hidraulice, aerostatice și electromagnetice care nu au elemente metalice în contact, sunt folosite din ce în ce mai mult. Lagărele hidraulice au dezavantajul că se încălzesc. De aceea lagărele electromagnetice și cele aerostatice sunt considerate ca alternative ce merită analizate.

Lagărele aerostatice sunt cel mai puțin studiate. Ca urmare, această lucrare își propune să facă o introducere în studiul lagărelor aerostatice cu control activ.

## 2. STADIUL ACTUAL

Lagărele aerostatice reprezintă soluția pentru lăgăruirea arborilor cu viteze mari și foarte mari de rotație. Acestea prezintă numeroase avantaje tehnice fata de lagărele clasice, cum ar fi lipsa frecării și a uzurii, viteze de rotație foarte mari, și o precizie bună deoarece amortizează foarte bine vibrațiile.

Dezavantaje:

- Costuri ridicate;
- Fabricarea acestor lagăre este dificilă;
- Necesită o sursă de aer sub presiune.

Cercetările au pornit prin realizarea unui model de arbore principal cu motor integrat pentru un centru de prelucrare prin frezare. Turația maximă a acestui arbore este de 36000 rpm, iar dimensiunile arborelui sunt superioare altor proiecte existente. De exemplu, diametrul lagărului din față este de 60 mm, ceea ce conduce la o viteză periferică de peste 6782 m/min. La aceste viteze nu există lagăre cu rulmenți care să reziste, chiar dacă aceștia ar fi realizați din materiale ceramice. Proiectul preliminar este reprezentat în figura 1. După primele calcule, lagărul aerostatic din față cu geometrie fixă, poate asigura o rezemare pentru o încărcare radială de 300 daN și de o încărcare axială de 500 daN. Din practică se cunoaște

<sup>1</sup> Specializarea Mașini-Unelte și Sisteme de Producție, Facultatea IMST;  
E-mail: [catalin.adrian.2007@gmail.com](mailto:catalin.adrian.2007@gmail.com)

## Sisteme de control activ pentru mașini-unelte cu comandă numerică

că în procesul de frezare forțele de reacțiune din lagărele arborelui principal sunt mai mari.

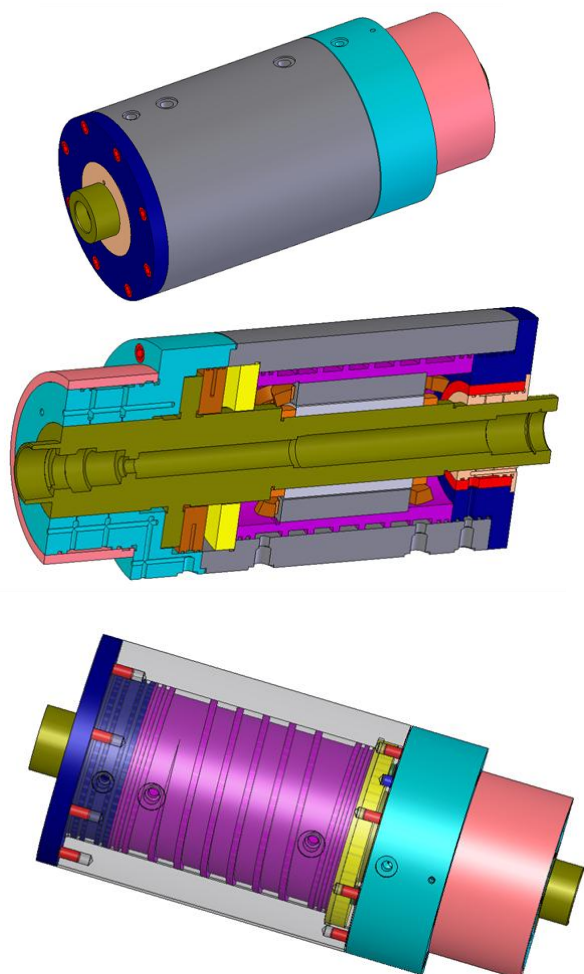


Figura 1. Arbore principal cu lagăre aerostactice

Pe baza calculelor s-a determinat că rigiditatea lagărului aerostatic pe direcția radială este de 60 N/ $\mu$ m, insuficientă pentru asigurarea unei precizii satisfăcătoare. Această constatare conduce la căutarea unor soluții de creștere a performanțelor lagărelor aerostactice. Una dintre metode este aceea de a introduce controlul activ. Prin aceasta se propune soluția modificării geometriei lagărului în sensul distribuirii neuniforme a presiunii în lagăr.

### 3. CONTROLUL ACTIV

Sistemele de control activ sunt folosite pentru a monitoriza și corecta factorii care pot influența procesele de prelucrare pe mașinile-unelte.

Dintre factorii care au cea mai importantă influență sunt: vibrațiile, temperatura, zgomotul, alte încărcări de natură statică (presiuni, forțe, momente etc.) Structura unui sistem de control activ este reprezentată simplificat în figura 2.

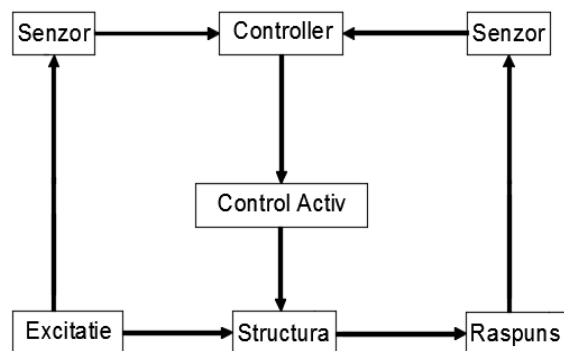


Figura 2. Sistem de control activ

Vibrațiile apar sub acțiunea unei forțe de așchiere în timpul procesului de prelucrare și pot fi definite ca mișcări repetitive sau oscilatorii ale unui obiect în raport cu un punct fix (poziția sa de echilibru).

Temperatura este un parametru fundamental de stare care caracterizează starea termică a unui corp, mai exact, starea de echilibru termodinamic. Circa 60-70% din deformațiile termice cauzează pierderea preciziei geometrice a mașinii-unelte.

Cel mai frecvent, forțele de natură statică au amplitudinea cea mai mare, iar acestea influențează cel mai mult deplasările arborelui în lagăre. Acestea sunt cel mai ușor de controlat, în timp ce solicitările de natură dinamică ce se manifestă sub forma unor vibrații sunt cel mai greu de controlat în timp real.

Pentru controlul vibrațiilor și al deplasărilor cauzate de încărcări statice se folosesc elemente de execuție (actuatoare), cele piezoelectrice fiind cel mai des utilizate datorită caracteristicilor lor. Actuatoarele generează mișcare și forță sub acțiunea unei încărcări electrice. Acestea pot oferi curse foarte scurte la frecvențe înalte (timp de răspuns mici). Actuatoarele piezoelectrice generează forțe mari în raport cu mărimea lor oferind un raport forță-deplasare foarte mare.

Frecvența de lucru a arborelui principal studiat este de până la 600 Hz. Aceasta presupune ca actuatoarele piezoelectrice ce se utilizează pentru controlul activ trebuie să aibă o frecvență proprie superioară pentru a evita fenomenele de rezonanță. Pentru exemplificare, dintre actuatoarele ce se comercializează pe piață, au fost alese cele de la firma Dynamic Structures & Materials. Din tabelul 1 s-a ales actuatorul cu codul [FPA-0200E-S-0536](#).

Tabel 1. Actuatore piezoelectrice

Cod	Cursa ( $\mu\text{m}$ )	Rigiditate ( $\text{N}/\mu\text{m}$ )	Frecv. rezonanță (Hz)	Forța (N)	Tensiune
FPA-0080E-S-0509	80	0.7	1750	56	-30 to +150
FPA-0085E-S-0518	85	2.3	1500	195	-30 to +150
FPA-0100E-S-0518	100	1.6	1300	160	-30 to +150
FPA-0150E-S-0518	150	0.71	930	107	-30 to +150
FPA-0200E-S-0518	200	0.48	690	96	-30 to +150
<b>FPA-0200E-S-0536</b>	<b>200</b>	<b>0.9</b>	<b>630</b>	<b>180</b>	<b>-30 to +150</b>
FPA-0200E-S-1018	200	2	790	400	-30 to +150
FPA-0300E-S-0536	300	0.49	480	147	-30 to +150
FPA-0400E-S-0536	400	0.33	435	132	-30 to +150
FPA-0500E-P-0518	500	0.08	100	30	-30 to +150
FPA-0500E-P-0536	500	0.22	440	110	-30 to +150
FPA-0500E-P-1036	500	0.72	400	360	-30 to +150
FPA-0550EHK-P-2054	550	2.5	340	1375	-30 to +150

Acest actuator se poate deforma cu până la 200  $\mu\text{m}$  sub acțiunea unei tensiuni de 150 V. Forța dezvoltată este de 180 N, iar frecvența de rezonanță este de 630 Hz ( $> 600$  Hz).

#### 4. OPTIMIZAREA FORMEI LAGĂRULUI AEROSTATIC

Pentru realizarea unui sistem cât mai simplu de control al geometriei lagărului s-a pornit de la o formă preliminară. Lagărul cu patru buzunare de formă dreptunghiulară, a fost prevăzut cu patru nervuri pe care pot acționa câte trei actuatore (în total s-au utilizat 12 actuatore). S-a considerat că lagărul se află sub acțiunea unei presiuni de 6 bari și cu încărcarea actualelor de pe două dintre nervuri, cu forțe de 180 N. S-a constatat că deformația preponderentă este dată de presiunea aerului din lagăr, iar controlul cu actuatore este prea puțin sensibil.

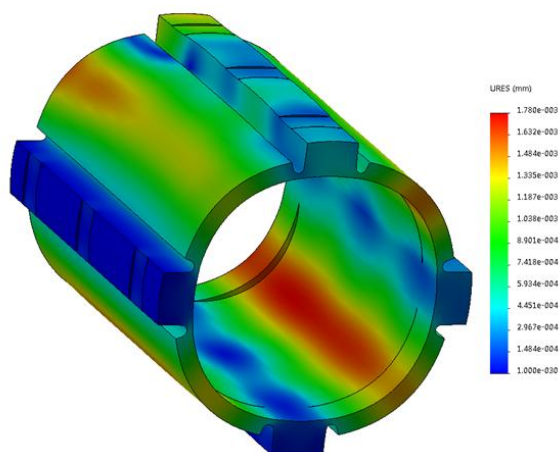


Figura 3. Distribuția deformațiilor pentru geometria inițială

Presiunea deformează lagărul mai mult decât elementele de acționare (actuatorele) piezoelectrice. Deformația maximă este de 10.78  $\mu\text{m}$ , iar în zona actualelor deformația este prea puțin sesizabilă.

Prin reducerea secțiunii în zona canalelor de control se obține o îmbunătățire a sensibilității structurii. Totodată a fost mărită grosimea peretelui astfel încât lagărul să rămână deformabil doar în zona controlată. Deformația maximă este de 2.84  $\mu\text{m}$  și este în zona controlată prin actuatorele piezoelectrice (fig. 4).

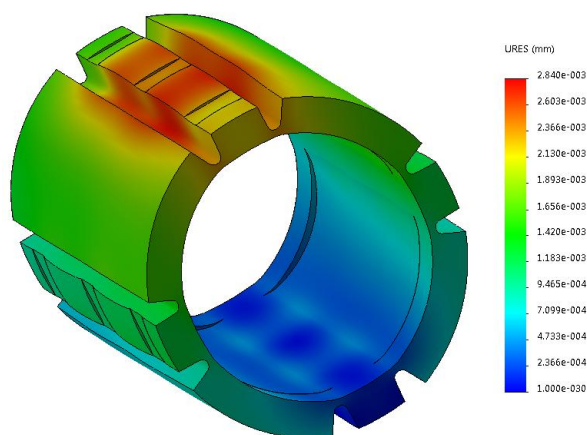


Figura 4. Deformații după optimizare intermediară

După mai multe iterații de optimizare, deformația este mult mai mare (fig. 5), iar geometria lagărului se modifică în sensul dorit.

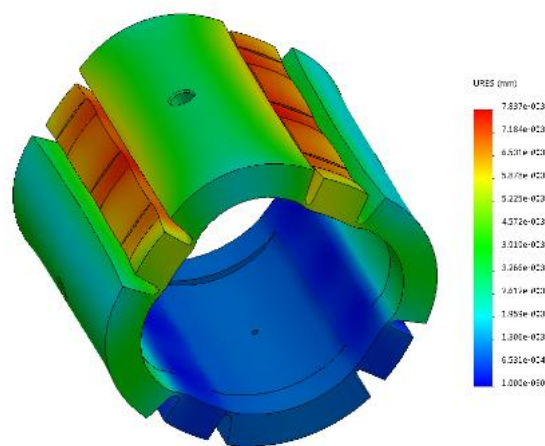


Figura 5. Deformațiile după optimizarea finală

Deformația maximă este de 7.83  $\mu\text{m}$ , suficientă pentru a controla și diferența presiunilor. Amintim că stratul de aer are o grosime de 25 micrometri, calculată pentru asigurarea unei rigidități de 60  $\text{N}/\mu\text{m}$ .

Modificarea formei lagărului va conduce la diferențierea presiunilor în cele patru buzunare și va “împinge” arborele principal în sensul indicat în figura 6.

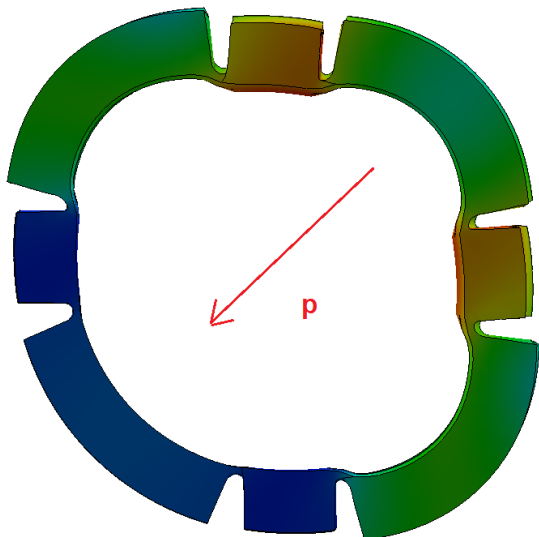


Figura 6. Rezultatul controlului activ

Punerea în evidență a efectului modificării geometriei lagărului se face pe baza unei analize de curgere a aerului în varianta cu geometrie nedeformată și cu geometrie deformată.

Utilizând elementele de geometrie Booleană s-a obținut modelul volumului de aer din lagărul radial din față (fig. 7). După aceea, utilizând programe de analiză a curgerii fluidelor (CFX/CFD din ANSYS), punând condițiile de intrare-ieșire aer și condițiile de frontieră specifice, s-a obținut modelul reprezentat în figura 8. Se observă forma buzunarelor în secțiune transversală și zona de alimentare cu aer.

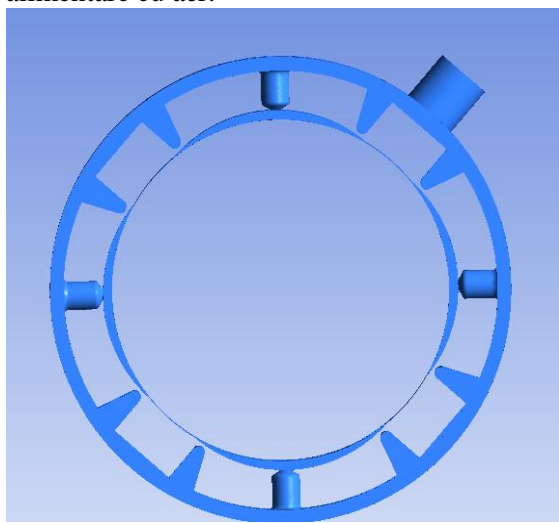


Figura 7. Model volum aer

Între buzunarele lagărului nedeformat se află punțițe cu grosimea de 25  $\mu\text{m}$ . Modelarea acestuia ridică unele probleme datorită dimensiunilor foarte reduse. Modelarea cu elemente finite introduce unele aproximări în rezultatele finale, dar prin comparație se pot trage concluziile necesare.

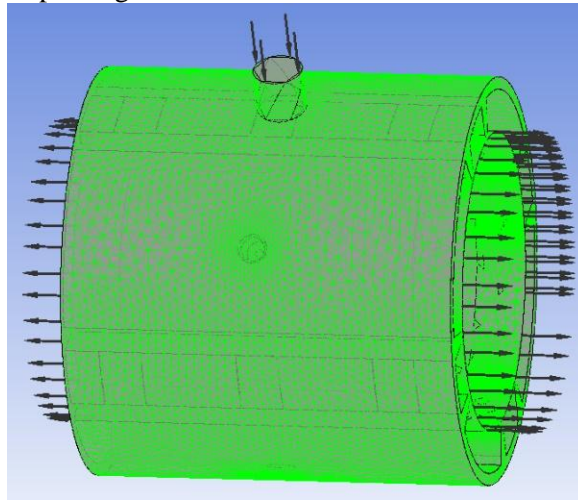


Figura 8. Modelul pentru analiza curgerii aerului

În timpul analizei, programul parcurge o serie de iterații pentru a atinge convergența soluțiilor (fig. 9). În această situație au fost necesare peste 150 iterații.

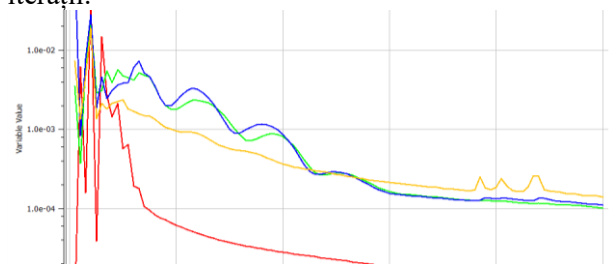


Figura 9. Rezultatul convergenței soluțiilor

Au fost realizate mai multe modele similare cu cel prezentat anterior, pentru fiecare fiind realizate simulările în aceleași condiții de intrare-ieșire și la limită. În continuare se prezintă doar parțial rezultatele analizelor efectuate, menționând care sunt concluziile comparației curgerii aerului prin lagăr cu lagărul nedeformat și cu lagărul deformat cu ajutorul celor 12 actuatori. Rezultatele analizei CFX/CFD (Computer Fluid Dynamics) pun în evidență distribuția presiunilor în lagăr, variația vitezelor din lagăr, precum și alți parametri (temperatură, vâscozitate, energie cinetică etc.). Pentru controlul activ, importante sunt distribuțiile presiunilor.

În condițiile în care lagărul nu este deformat, presiunile se distribuie simetric în lagăr și sunt destul de uniforme (fig. 10).

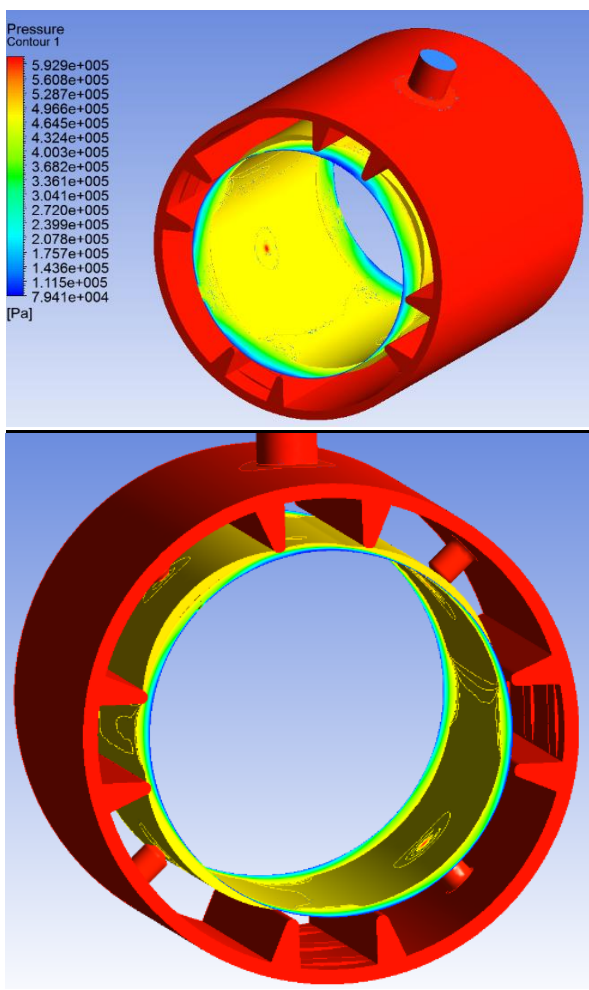


Figura 10. Distribuția presiunilor în lagăr

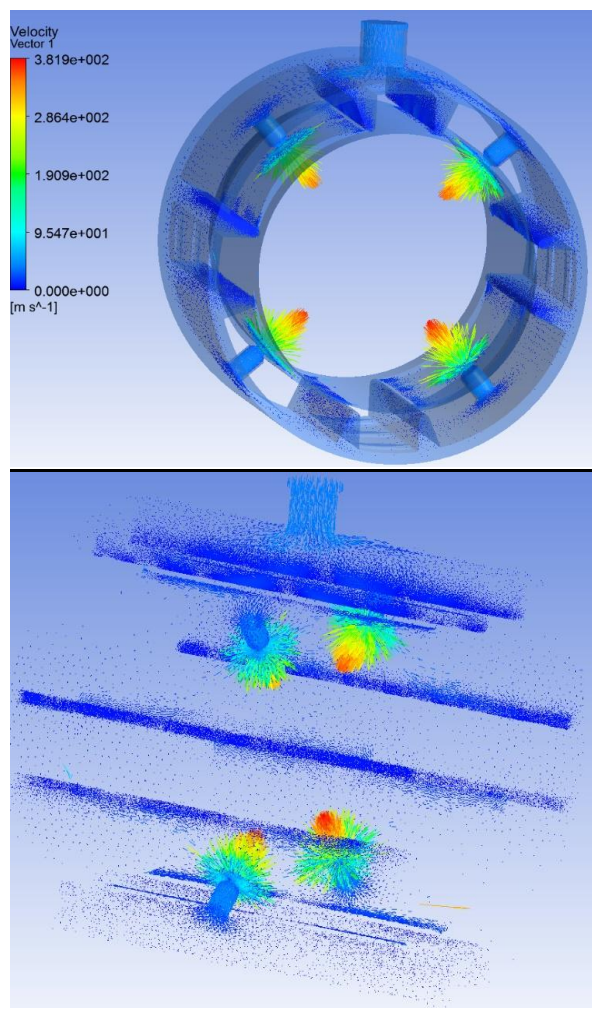


Fig. 11. Distribuția vectorilor viteză în lagăr

Dacă presiunea aerului la intrarea în lagăr s-a considerat a fi de 6 bari, se observă că la suprafața arborelui presiunea rămâne la aproximativ 4.6 bari (culoarea galbenă). Pierderea de presiune se datorează rezistențelor pneumatice care alimentează fiecare buzunar (duze). Aceste rezistențe pneumatice au un rol foarte important în realizarea portanței lagărului. Efectul acestora se poate observa foarte bine analizând distribuția vitezelor aerului (fig. 11). În zona rezistențelor viteza aerului are valori foarte mari (381 m/s) producând un zgomot destul de însemnat care se înscrie printre dezavantajele lagărelor aerostatice.

Datorită configurației lagărului și în special a camerei de distribuție în care creștăturile de flexibilizare împiedică curgerea laminară a aerului. Se observă astfel crearea unor turbioane în anumite zone ale lagărului (fig. 12). Acestea pot fi reduse printr-o modelare corespunzătoare a zonelor inactive ale lagărului. Acestea vor fi analizate într-o lucrare ulterioară.

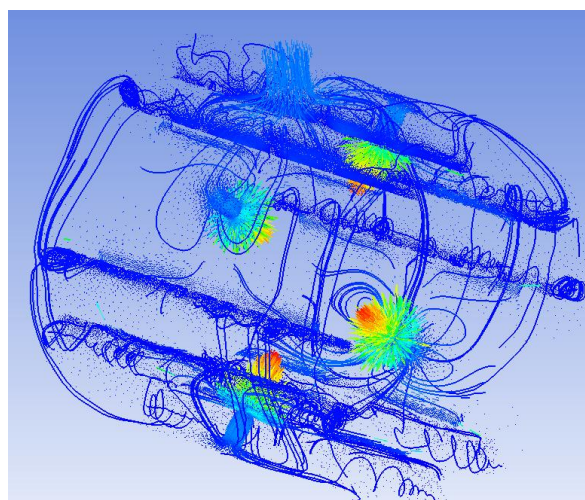
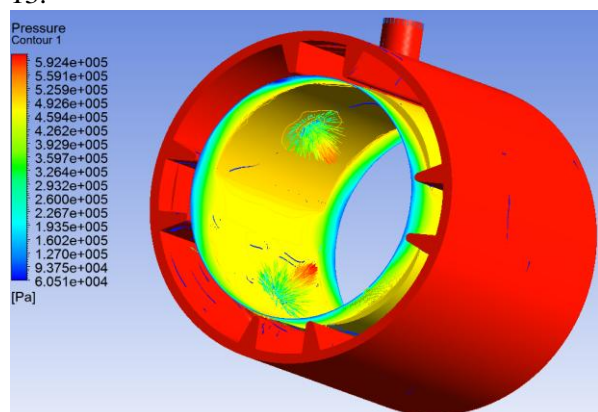


Figura 12. Curgerea turbionară

Dintre analizele realizate, vom prezenta rezultatele în care am calculat deformația lagărului sub acțiunea actuatorilor piezoelectrice (cazul din figura 6 cu deplasarea de 7.83  $\mu\text{m}$ ). Se urmărește cum se distribuie presiunile în această situație prin comparație cu lagărul cu geometrie nedeformată.

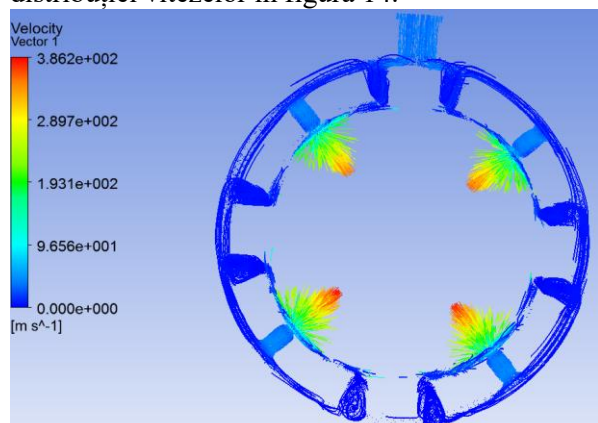
De data aceasta presiunile se distribuie ca în figura 13.



**Figura 13. Distribuția presiunilor în urma controlului activ**

De data aceasta presiunile nu mai sunt distribuite simetric. Se observă o creștere a presiunii pe unul dintre buzunare. Diferențele sunt în medie de la 4.59 bari la 5.25 bari (adică 0.66 bari). Această diferență produce un dezechilibru de 31.68 daN (suprafața lagărului este de 60x80 mm). Această diferență de forțe va determina împingerea arborelui spre centrul lagărului și va reduce efectul încărcării exterioare.

Același efect se constată și pe baza analizei distribuției vitezelor în figura 14.



**Figura 14. Distribuția vitezelor în lagărul deformat**

Se observă că vitezele aerului prin cele patru duze diferă. Cea mai mare viteză a crescut până la 386 m/s.

Datorită dimensiunilor mici ale filmului de aer, aceste rezultate pot diferi de ceea ce se petrece în realitate în lagăr. Cu toate acestea, identificarea diferențierii presiunilor este foarte importantă.

## 5. CONCLUZII

Lagărele aerostatice se pot folosi cu succes la arborii principali ai mașinilor-unelte, în special pentru arborii principali cu viteze mari de rotație.

Avantajele lagărelor aerostatice constau în faptul că nu se încălzesc, nu există contacte, amortizează vibrațiile.

Principala problemă apare prin faptul că, aerul fiind compresibil, prin modificarea geometriei lagărului ca urmare a controlului activ, reacția schimbării poziției arborelui se face cu o întârziere. Această întârziere, cu toate că este foarte mică, nu permite controlul unor variații de încărcare care se manifestă cu frecvență foarte ridicată. Fenomenele statice și cvasistaționare se pot corecta cu succes, dar fenomenele dinamice cu frecvență de peste 400 Hz ar putea să nu dea rezultate. Cercetări ulterioare vor avea în vedere și creșterea vitezei de reacție pentru a răspunde în timp real solicitărilor externe.

## BIBLIOGRAFIE

- [1]. Van Brussel H., Al Bender F., Dogariu C. - *Aspects in the Design of a High Frequency Milling Spindle Using Air Bearings* — în revista Tehnologie, Calitate, Materiale, Mașini TCMM nr. 20, Editura Tehnica, București, 1996, pag. 21-26.
- [2]. Anthony S White - *Simulation of Active Control of Chatter Vibrations* - International Journal of Recent Development in Engineering and Technology Website: [www.ijrdet.com](http://www.ijrdet.com) (ISSN 2347 - 6435 (Online)) Volume 3, Issue 4, October 2014), pag. 6-13.
- [3]. Tatiana Smirnova - *Analysis, Modeling and Simulation of Machine Tool Parts Dynamics for Active Control of Tool Vibration* - Doctoral Dissertation Series No 2010:08, Blekinge Institute of Technology Sweden, ISSN 1653-2090
- [4]. G. Aguirre, F. Al-Bender, H. Van Brussel - *Dynamic stiffness compensation with active aerostatic thrust bearings* – Proceedings of ISMA 2008, K.U.Leuven, Department of Mechanical Engineering, Belgium, p. 105-117
- [5]. Jiří Tůma, Jiří Šimek, Jaromír Škuta and Jaroslav Los - *Active vibration control of journal bearings with the use of piezoactuators* - Engineering the Future, ISBN 978-953-307-210-4 [www.intechopen.com](http://www.intechopen.com), p. 141-158
- [6]. Jen-Chen Chuang<sup>1</sup>, Chi-Yin Chen<sup>2</sup>, Jia-Ying Tu - *Active control of multi-input hydraulic journal bearing System* - Journal of Physics: Conference Series 744 (2016) 012062