

نمذجة ومحاكاة الاهتزازات في الخراطة الطولية باستخدام Matlab لتحليل استقرار عملية القطع

د. محمد خير محمد*

اماني ناصر**

(تاريخ الإيداع 22 / 10 / 2020. قَبْلُ للنشر في 3 / 3 / 2021)

□ ملخص □

تم إجراء البحث في عام (2020م) في جامعة تشرين، ويتضمن تصميم عملية نمذجة رياضية ومحاكاة حاسوبية للحالة الديناميكية في نظام أداة قطع - مشغولة في عملية الخراطة الطولية انطلاقاً من النموذج الرياضي الواصف للنظام، وهو نموذج خطي.

في البداية تم استنتاج المعادلات التفاضلية الواصفة للحالة الاهتزازية بين المشغولة وأداة القطع رياضياً، ثم تطبيق المحاكاة الحاسوبية للنموذج الرياضي المستنتج باستخدام برنامج Matlab وذلك من أجل بارامترات محددة، وبالتالي من خلال قراءة النتائج والمنحنيات الواصفة لها يمكن التأكد فيما إذا كان النظام مستقراً أو غير مستقر، والذي يلعب دوراً أساسياً في جودة سطح المشغولة.

الكلمات المفتاحية: النمذجة والمحاكاة، الخراطة، نموذج خطي، الاهتزاز، الاستقرار.

* مدرس - قسم هندسة التصميم والإنتاج - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.
** طالبة دراسات عليا (ماجستير) قسم هندسة التصميم والإنتاج - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

Modeling and Simulation of Vibrations in Turning Using Matlab to Analyse Stability of the Cutting Process

Dr. Mohamad Kheir Mohamad*
Amani Nasser**

(Received 22 / 10 / 2020. Accepted 3 / 3 / 2021)

□ ABSTRACT □

The study has been carried out during the year 2020 in Tishreen University. Modeling and simulation has been done for dynamic state of tool - workpiece system in turning, based on the mathematical model of system, where the mathematical model used is a linear model.

In the beginning, the differential equations that describe the vibration between the workpiece and the cutting tool have been mathematically concluded, then modeling and simulation operations for specific parameters have been applied for the mathematical model using Matlab, so we can make sure if the system is stable or unstable, which affect directly on the quality of workpiece.

Keywords: Modeling and Simulation, linear model, turning, vibration, stability.

*Assistant Professor, Department of Design and Production, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

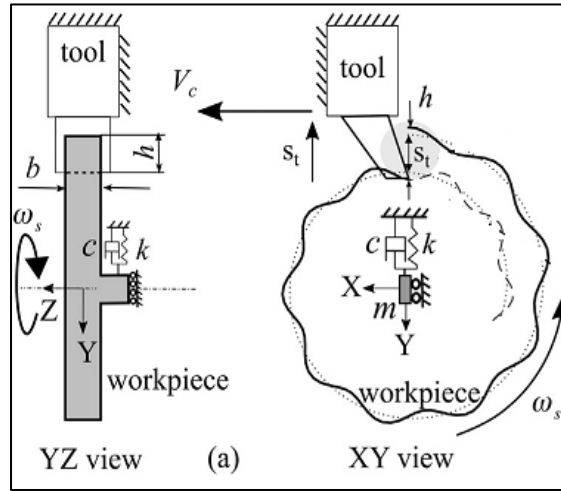
**Postgraduate Student (Master) , Department of Design and Production , Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

مقدمة:

تعتبر عملية الخراطة عملية التشغيل الأساسية المستخدمة بشكل واسع في صناعات قطع المعادن، كما يعد اختيار بارامترات التشغيل في عملية الخراطة الطولية مسألة مهمة وذلك للحصول على قابلية تشغيل جيدة وإنهاء سطوح أفضل ومعدل أقل لتآكل أداة القطع.

لقد تبين أنّ اهتزازات القطع هي اهتزازات ذاتية التحريض تنتج خلال عمليات التشغيل (Altintas, 2012) ، و (Ahmadi, 2017).

يوضح الشكل (1) تمثيلاً تخطيطياً لنظام أداة قطع-مشغولة في الخراطة الطولية.



الشكل 1: شكل تخطيطي لعملية القطع بالخراطة الطولية

تترك الاهتزازات ذاتية التحريض سطوح متموجة على العناصر المشغلة (المشغولات) وذلك ما يسبب تجاوز عن حدود التسامحات الممكنة للتشغيل، مما يؤدي إلى خسارة انتاجية ناتجة عن الطبيعة المدمرة لاهتزازات القطع والتي تؤدي إلى أذية كل من المشغولة وأداة القطع (Gaber, 2016).

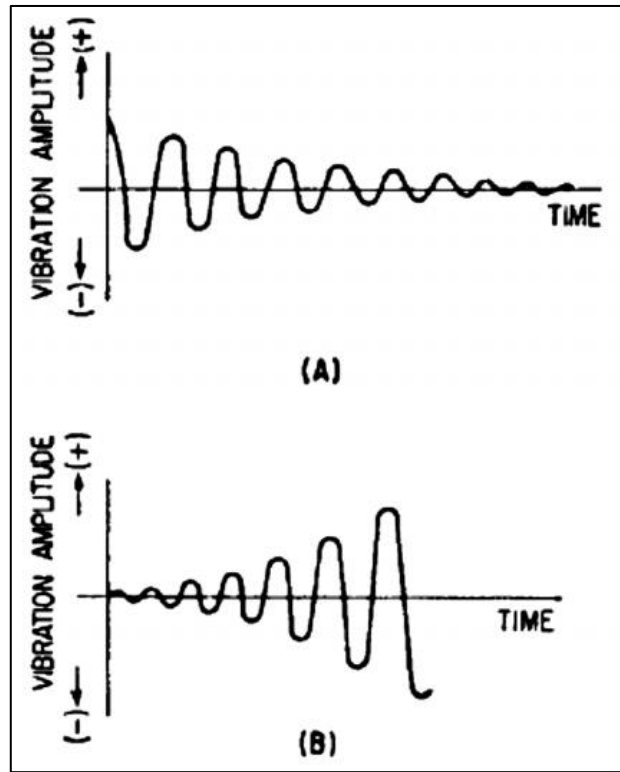
وهنا لابد من الإشارة إلى أهمية تطبيق أنظمة تخميد الاهتزاز ودورها الفعلي في التقليل من حدة الاهتزاز (Stepan, 2001). إن الاهتزازات الناتجة عن تموج السطح هي أكثر الاهتزازات تأثيراً ، فهي تسبب حركة عنيفة بين المشغولة وأداة القطع (Siddhpura and Paurobally, 2012).

أشار (Mei, 2006) إلى أن تأثير اهتزاز أداة القطع على نعومة القطع في الخراطة الجافة يتغير مع تغير بارامترات القطع وزوايا أداة القطع.

كما قام (Guillermo *et al.*, 2018) بدراسة سلوك عملية الخراطة في steel 1020, steel 1035, steel 1045 بهدف الحصول على حدود متغيرة للاستقرار في عملية الاهتزاز ذاتي التحريض الناتج في أداة القطع ، كما تم تطوير أداة حاسوبية قادرة على إعطاء مخططات الاستقرار.

عندما يكون النظام مستقرًا فإن الاهتزازات تتخادم مع الزمن، وعلى العكس فإن هذه الاهتزازات تتردد مع الزمن كاستجابة للأنظمة غير المستقرة، أما الاستقرار الحدي فهو حالة النظام التي تحدد حدود الاستقرار بين المجالين السابقين، والطريقة المثالية لتحديد شروط القطع المثالية هي مخطط فصوص الاستقرار (مجالات الاستقرار) stability lobe diagram (SLD) (Sturacci, 2015).

يوضح الشكل (2) استجابة النظام في الحالة المستقرة و غير المستقرة.



الشكل 2: (A) اهتزازات متلاشية (مستقرة) والتي ترتبط بالجذور العقدية ذات أجزاء حقيقية سالبة (B) اهتزازات متزايدة (غير مستقرة) و ترتبط بالأجزاء الحقيقية الموجبة للجذور العقدية

عند مراعاة الدقة في اختيار بارامترات القطع مثل سرعة الدوران وعرض القطع تقل الحاجة لعمليات إنهاء وتنعيم السطوح بعد عملية الخراطة، ولكن عملية القطع قد تصبح غير مستقرة من أجل بعض قيم سرعة الدوران وعرض القطع، وذلك سيؤدي بدوره إلى إنهاء سطوح غير مرغوب بها وتقليل في عمر أداة القطع (MAGRAB, 2009). من هنا جاءت أهمية دراسة الاهتزاز خلال عملية القطع.

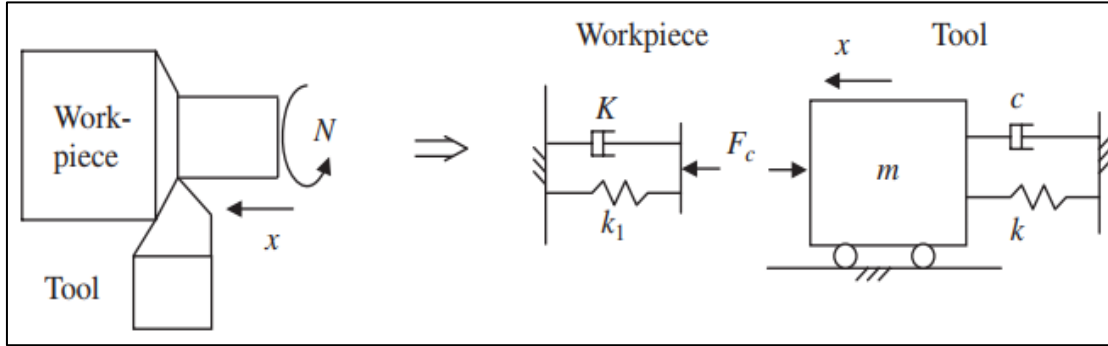
أهمية البحث و أهدافه:

تتراوح ظروف التشغيل في عملية الخراطة (معدل التغذية وسرعة القطع) ضمن مجالات متفاوتة إلى حد كبير، تبعاً لطبيعة المادة المشغلة ولجودة إنهاء السطح المراد الحصول عليه. من هنا تتبع أهمية دراستنا في تحديد ظروف القطع الآمنة لجهة الاستقرار والتي تنعكس على جودة إنهاء السطوح ودقة تصنيع المشغولة وعمر أداة القطع. يهدف البحث إلى ما يلي:

الحصول على نموذج رياضي للاهتزاز بين أداة القطع والمشغولة في عملية الخراطة مع الأخذ بعين الاعتبار تأثير كل من: أبعاد المشغولة، ونوع مادة المشغولة، ونوع أداة القطع، ومرونة أداة القطع والمشغولة، وظروف التشغيل من أجل تحديد ظروف القطع المثالية (المستقرة) بما ينعكس على جودة سطح المشغولة.

طرائق البحث ومواده:

- النمذجة الرياضية باستخدام المعادلات التفاضلية لعملية القطع لتحديد الاستجابات الناتجة (سلوك الاهتزاز).
- تطبيق المحاكاة باستخدام أداة نمذجة ومحاكاة هي Matlab.
- النموذج الرياضي للاهتزاز بين المشغولة و أداة القطع في الخراطة الطولية:
- يمكن تمثيل طبيعة الحركة والاهتزاز بين المشغولة وأداة القطع وفق نظام (كتلة - نابض - مخمد) (MAGRAB, 2009) كما هو موضح بالشكل (3).



الشكل 3: نموذج أداة القطع والمشغولة خلال عملية الخراطة الطولية

حيث:

c : ثابت التخميد الناتج عن البنية.

k : ثابت صلابة حامل أداة القطع.

F_c : قوة القطع الديناميكية.

k_1 : ثابت صلابة القطع.

K : معامل معدل الاختراق، ويحدد تجريبياً.

N : السرعة الدورانية للمشغولة (عدد الدورات خلال ثانية واحدة).

حسب قانون نيوتن الثاني:

$$\sum F_x = m \cdot \ddot{x}$$

حيث:

m : كتلة أداة القطع وحامل أداة القطع.

من مخطط الجسم الحر:

$$-c\dot{x} - kx - F_c = m\ddot{x}$$

$$F_c = \underbrace{k_1}_{\text{ثابت صلابة القطع}} \left[\underbrace{x(t) - \mu x \left(t - \frac{2\pi}{N} \right)}_{\text{التغير في سماكة الرايش}} \right] + \underbrace{K \frac{2\pi}{N}}_{\text{التخميد}} \dot{x}$$

$x(t)$: تابع الحركة بين أداة القطع والمشغولة.

μ : معامل الاحتكاك المقاس بين عمليتي قطع متتاليتين.

$$0 \leq \mu \leq 1$$

عند عملية خراطة قلاووظ تكون $\mu = 0$

عند عملية الخراطة للقطع (الفصل) $\mu = 1$

إذا كانت $\mu = 0$ فإن الاهتزازات المرخصة ذاتياً مستحيلة الحدوث، أي أن الاهتزازات ذاتية التحرض تنتج عندما $0 < \mu \leq 1$ أي عندما تتغير سماكة الرايش تبعاً لتموج السطح الناتج عن عملية القطع السابقة (Osterlind,2011).

بتعويض F_c بالمعادلة الناتجة عن مخطط الجسم الحر:

$$\ddot{x} + \left(\frac{1}{Q} + \frac{K}{k\Omega}\right)\dot{x} + \left(1 + \frac{k_1}{k}\right)x - \mu \frac{k_1}{k}x \left(\tau - \frac{1}{\Omega}\right) = 0$$

حيث:

$$\Omega = \frac{N}{2\pi w_n}$$

$\tau = w_n t$ ويمثل الفترات المتعاقبة لمرور أداة القطع على المشغولة، والتي تساوي الزمن اللازم لدورة واحدة للمشغولة في عملية الخراطة.

$w_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$ التردد الطبيعي غير المتخامد.

Q: معامل الجودة $Q = \frac{1}{2\zeta}$

$$2\zeta = \frac{c}{m w_n}$$

ζ : هي نسبة التخميد وتساوي $\zeta = \frac{c_c}{c}$

حيث C: معامل التخميد الفعلي.

c_c : معامل التخميد الحرج، وهو التخميد الذي تصل عنده المنظومة للحالة المستقرة بأقل زمن دون تجاوز القيمة المستقرة.

علماً أنه من أجل $\zeta = 0$ تكون المنظومة غير متخامدة، ومن أجل $\zeta > 1$ تكون الاستجابة عابرة فوق متخامدة، وعند $\zeta = 1$ يكون التخميد حرج للاستجابة العابرة، أما من أجل $\zeta < 1$ تكون الاستجابة عابرة تحت متخامدة، أي أن المنظومة تصل إلى الحالة المستقرة مع وجود ذبذبة.

بالتالي فالمعادلة النهائية هي معادلة تفاضلية خطية متجانسة من الرتبة الثانية:

$$\ddot{x} + \left(\frac{1}{Q} + \frac{K}{k\Omega}\right)\dot{x} + x + \frac{k_1}{k} \left(x - \mu x \left(\frac{1}{\Omega}\right)\right) = 0$$

حل المعادلة من الشكل:

$$x = A e^{\lambda \tau}$$

وبالتعويض:

$$\lambda^2 + \left(\frac{1}{Q} + \frac{K}{k\Omega}\right)\lambda + 1 + \frac{k_1}{k} \left(1 - \mu e^{-\frac{\lambda}{\Omega}}\right) = 0$$

مجالات الاستقرار في عملية القطع:

- من أجل أن يكون النظام مستقرًا يجب أن يكون: $Re[\lambda] < 0$
أي الجزء الحقيقي $\delta < 0$

- الحدود بين المناطق المستقرة وغير المستقرة توافق $\delta = 0$

- عندما يكون λ تخيلياً تماماً، تكون الاستجابة تذبذبية (Ganguli, 2007).

لإيجاد حدود الاستقرار نجعل $\lambda = jw$ ، بتعويض هذه القيمة في المعادلة الأخيرة، ثم بفصل المعادلة لجزأين حقيقي وتخيلى:

$$\frac{1}{Q} + \frac{K}{k\Omega} + \mu \frac{k_1 \sin(w/\Omega)}{k w} = 0 \quad (\text{التخيلى})$$

$$w^2 = 1 + \frac{k_1}{k} (1 - \mu \cos(w/\Omega)) \quad (\text{الحقيقي})$$

في المعادلة التخيلية يجب أن تكون القيم $\mu, \frac{K}{k}, \frac{k_1}{k}$ معلومة، وقيم Ω تتراوح ضمن مجال محدد ومن أجل أي قيمة Ω تحدد قيمة جديدة لـ w ويمكن تعيينها من المعادلة الحقيقية.

نجعل Q معامل الجودة تابعاً لـ Ω والذي يدل على مستوى التخميد في المنظومة.

نستخدم قيم Ω, w في المعادلة التخيلية لتحديد القيم الموجبة لـ Q (والتي تحدد حالة التخميد في المنظومة) والتي تحقق المعادلة:

$$\frac{1}{Q} = -\frac{K}{k\Omega} - \mu \frac{k_1 \sin(w/\Omega)}{k w}$$

الغاية من تحديد القيم الموجبة لـ Q هي الوصول إلى القيم الموجبة لـ δ

ثم بعد ذلك يتم رسم مخطط علاقة Q مع Ω

الحدود بين المناطق المستقرة وغير المستقرة توافق $\delta = 0$

النتائج والمناقشة:

من أجل سبيكة EN31 Steel وبما يتوافق مع (Karthik et al., 2020) تعطى البارامترات في الجدول (1).

جدول 1: البارامترات المستخدمة في المحاكاة

u (ترمز لـ μ)	Kk (ترمز لـ $\frac{K}{k}$)	$k1k$ (ترمز لـ $\frac{k_1}{k}$)
1	0.0029	0.0785

تم تصميم خوارزمية بلغة Matlab تعتمد على منهجية تحديد مجالات الاستقرار المشار إليها أعلاه.

```
clc
clear
chat = inline('1-w.^2+k1k*(1-u*cos(w/phi))', 'w', 'u', 'k1k', 'phi');
k1k = 0.0785;
Kk = 0.0029;
u = 1;
phi = linspace(0.01, 0.5, 500);
L = length(phi);
w = zeros(L,1);
for n = 1:L
```

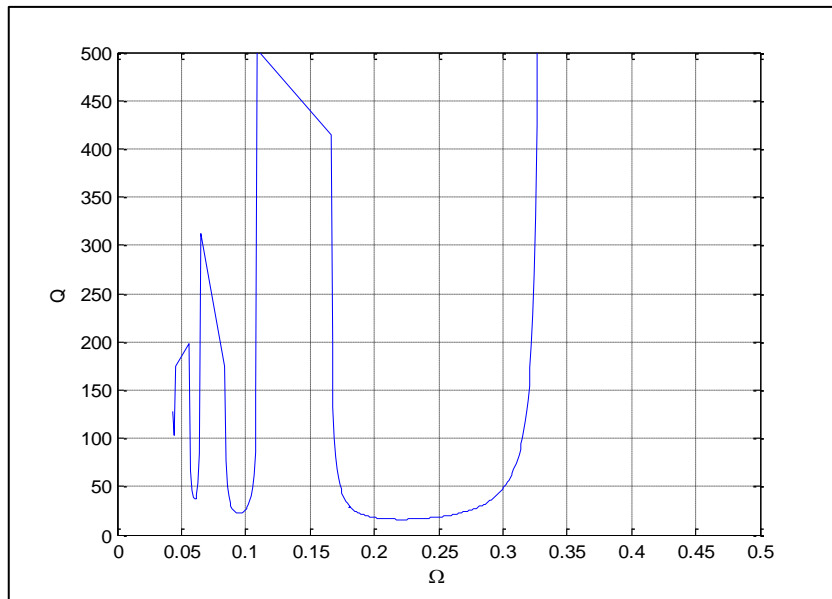
```
w(n) = fzero(chat, [0.8 1.2], [], u, k1k, phi(n));
end
xx = -1./(Kk./phi'+u*sin(w./phi')./w*k1k);
indx = find(xx >= 0);
plot(phi(indx), xx(indx))
xlabel('\Omega')
ylabel('Q')
grid on
axis([0 0.5 0 500])
```

تم فرض 500 قيمة لـ Ω ما بين (0.01, 0.5) وبالتالي حصلنا على 500 قيمة لـ Q كانت أداها (-996.634) وأقصاها (595.9627)، ولكن تم اختيار القيم الموجبة لـ Q حصراً.

عند تنفيذ المحاكاة ينتج لدينا المخطط المبين بالشكل رقم (4)

والذي يحاكي مناطق الاستقرار من أجل القيم المعطاة في الجدول (1)، حيث يوضح الشكل حدود الاستقرار من أجل القيم المختلفة لكل من:

- Ω : أي قيم مختلفة لعدد الدورات N ، و/أو التردد الطبيعي للمنظومة w_n الذي يحدد من خلال ثابت صلابة حامل أداة القطع k وكتلة كل من أداة القطع وحامل أداة القطع m .
- معامل الجودة Q والذي يحدد مقدار التخميد في المنظومة والذي يعتمد على كل من: تخميد المنظومة الفعلي c ، والتردد الطبيعي للمنظومة w_n ، وكتلة كل من أداة القطع وحامل أداة القطع m .



الشكل 4: رسم بياني يوضح مناطق الاستقرار في عملية القطع

يشير المنحني الناتج من خلال المحاكاة الموضح بالشكل إلى الحد الفاصل ما بين المناطق المستقرة وغير المستقرة لعملية القطع، فإذا وقعت النقطة (والتي تمثل بارامترات قطع معينة) تحت المنحني فيعتبر النظام مستقرًا، أما إذا وقعت فوقه فالنظام غير مستقر، وذلك لأن المنحني نتج عن حدود استقرار عملية القطع من خلال حل معادلة الجزء الحقيقي، وبالتالي أي زيادة فوق المنحني عند نفس قيمة Ω تعني زيادة في معامل الجودة Q ، أي نقصاناً في قيمة نسبة تخامد

المنظومة ζ ، وهذا يعني خروجاً عن وضع الاستقرار الحرج، الذي يمثله المنحني، وبذلك يمكن تحديد حالة النظام فيما إذا كان مستقرًا أو لا، مما يتيح إمكانية التحديد بشكل مسبق لضرورة تغيير إحدى البارامترات أو أكثر في حال كان النظام غير مستقرًا للوصول إلى الحالة المستقرة، إذ يصبح تلافي نتائج عدم الاستقرار بعد تنفيذ عملية القطع صعباً، والذي غالباً ما ينتج عنه جودة سطح مشغولة منخفضة قد تفقد معه المشغولة دورها الوظيفي المصممة لأجله، وهذا يعني تلف المشغولة وإعادة الإنتاج من جديد، إضافة إلى اهتراء أداة القطع، مما يترتب عليه المزيد من الكلفة وهدر الوقت والجهد.

الاستنتاجات والتوصيات:

الاستنتاجات:

- النمذجة الرياضية للاهتزاز بين أداة القطع والمشغولة تعطي وصفاً شاملاً للحالة الديناميكية للاهتزاز.
- إن نتائج المحاكاة تعطي دلالات مهمة عن استقرار عملية القطع.
- إذا تبين بالمحاكاة أن العملية غير مستقرة، فهذا يوفر الوقت والجهد والكلفة فيما لو لم يتم الكشف عن ذلك إلا بالتطبيق الفعلي، لأن ذلك سيسبب عيوباً في سطح المشغولة قد لا يمكن إصلاحها، إضافة إلى اهتراء أداة القطع.
- يمكن الاستفادة من النموذج المصمم على Matlab في التنبؤ مسبقاً بديناميكا عملية القطع فيما يخص الاستقرار، والذي يؤثر مباشرة على كل من جودة سطح المشغولة في الخراطة الطولية وعمر أداة القطع.

التوصيات:

- العمل على تطوير النموذج السابق ليصبح قادراً على تحديد ما يجب أخذه من إجراءات تخص بارامترات عملية القطع فيما لو تبين أن عملية القطع غير مستقرة.
- العمل على استنتاج نماذج رياضية للتنبؤ باستقرار عمليات القطع المختلفة.

References:

- 1- AHMADI, K. *Analytical Investigation of Machining Chatter by Considering the Nonlinearity of Process Damping*. Journal of Sound and Vibration, 2017.
- 2- ALTINTAS, Y. *Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations, and CNC Design*. 2nd Edition, Cambridge University Press, New York, USA, 2012.
- 3- GABER, O. *Numerical and Experimental Modal Analysis of Machine Tool Spindles Accounting for System Decay and its Application to Chatter Avoidance*. Toronto, Ontario, Canada, 2016.
- 4- GANGULI, A.; DERAEMAEKE; PREUMONT, A. *Regenerative Chatter Reduction by Active Damping Control*. Journal of Sound and Vibration, 2007, 300: 847-862.
- 5- GULLERMO, V. O.; PENALOZA, C. A.; SALCEDO, M. C. *Regenerative Chatter Phenomenon in the Turning Process Based on the Alloy Steels 1020, 1035 and 1045*. International Journal of ChemTech Research, 2018,11(09): 108-114.
- 6- KARTHIK, M. S. RAJU, V. R. REDDY K. N. et al. *Cutting Parameters Optimization for Surface Roughness during Dry Hard Turning of EN31 Bearing Steel Using CBN Insert*. Materials Today: Proceedings, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.224>

- 7- MAGRAB; AZARM, S.; BALACHANDRAN, B.; DUNCAN, J. H.; HEROLD, K. E.; WALSH, G. C. *An Engineer's Guide to MATLAB*. College Park, MD, 2009, 3rd Edition.
- 8- MEI, C.; CHERNG, JG.; WANG, Y. *Active Control of Regenerative Chatter During Metal Cutting Process*. Trans ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2006, 128: 346-349.
- 9- OSTERLIND, T. *Investigation of Vibrations during Internal Turning: An Experimental and Numerical Study*. Department of Industrial Production, KTH, Stockholm, 2011.
- 10- SIDDHPURA, R.; PAUROBALLY. *A Review of Chatter Vibration Research in Turning*. International Journal of Machine Tools & Manufacture 61, 2012, 27-47.
- 11- STEPAN, G. *Modeling Nonlinear Regenerative Effects in Metal Cutting*. The Royal Society, 2001, 359, 739-757.
- 12- STURACCI, J. *Modelling of Machining Systems Dynamic Behaviour*. KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 2015.