

المعايرة الديناميكية لأخطاء نقل الحركة في آلات التشغيل

الدكتور محمد زهرة*

تاريخ الإيداع 9 / 12 / 2013. قُبل للنشر في 14 / 5 / 2014

□ ملخص □

يوجد العديد من الأخطاء الحركية غير المرغوبة في آلات التشغيل، والتي تتشكل إما نتيجة لتصميم هذه الآلات أو نتيجة لأحمال مطبقة عليها أو لتشوّهات حرارية فيها. وهناك عدة طرق نظامية لتعبير الآلة وللتعويض عن هذه الأخطاء. لقد استخدمت اختبارات القياس الستاتيكية (الساكنة) لعدة سنوات من أجل قبول آلات التشغيل. إلا أن الاختبارات الستاتيكية تلتقط المعطيات أو البيانات في عدد من المواقع المستهدفة (المحددة) فقط على طول المحور، بينما تستطيع الاختبارات الديناميكية (الحركية) أن تلتقط حالياً الآلاف من نقاط المعطيات أو البيانات والآلة في حالة تشغيل أو حركة .

تقدم في هذا البحث اختبارات المعايرة الديناميكية التي تم إجراؤها على آلات التشغيل، والتي تُظهر بعض المشاكل التي لم يكن بالإمكان الكشف عنها في الماضي في آلات التشغيل كشفاً دقيقاً، و لم يكن بإمكان الاختبارات الستاتيكية اكتشافها أيضاً. وذلك توفيراً في الوقت أو الزمن، ووصولاً إلى دقة عليا، ومعرفة فضلى الأخطاء الهندسية وأماكن توضعها.

الكلمات المفتاحية: المعايرة الديناميكية، اختبارات القياس، أخطاء نقل الحركة، آلات التشغيل.

*أستاذ - قسم هندسة التصميم والإنتاج - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

Dynamic Calibration for Transmission Errors of Machine Tools

Dr. Mohamad Zahra*

(Received 9 / 12 / 2013. Accepted 14 / 5 / 2014)

□ ABSTRACT □

There are many errors kinetic unwanted in machines tools, either as a result of design or as a result of loads applied to them or to the thermal distortions. There are several systematic methods for calibration of the machine and to compensate for of these errors, have been used Static tests of measurement for several years to accept the machines operating. Static tests that pick up data in a number of sites targeted (specific) only along the axis, while the tests can dynamic to pick up the now thousands of data points and the machine in operation or movement.

In this research we present Dynamic calibration tests that were made to machine tools, which show some of the problems could not be detected in the past in operating machines thoroughly, and have not been able to test as well as Static also discovered. In order to save time, and arrive to higher accuracy, and better knowledge of the engineering errors and position places.

Keywords: Dynamic Calibration, Measurement Tests, Transmission Errors, Machine Tools.

*Professor, Production and Design Engineering Department- Faculty of Mech. & Elect. Eng – Tishreen University, Lattakia, Syria

مقدمة:

إن نوعية المنتج مهمة لكل من مصنعي آلات التشغيل ومستخدميه النهائيين. وهناك حاجة وضغط كبيرين من أجل تقصير فترات (زمن) دورة الإنتاج، والحفاظ على مستوى ثابت وعالٍ في نوعية المنتج. ويزداد هذا الضغط عندما يتطلب تحقيق إنتاج "صحيح للمرة الأولى". ولتحسين دقة المنتج، لابد من تحسين دقة آلات التشغيل [1].

ندرس في هذا البحث كيفية التفحص والإجراء للاختبارات الديناميكية (الحركية) من أجل توفير الوقت والوصول إلى دقة عليا. وكذلك معرفة فضلي مكان توضع الأخطاء الهندسية (تحديد المواقع) [2]. تتم القياسات الستاتيكية (الساكنة) من أجل دقة التوضع ببرمجة الآلة لتتحرك إلى سلسلة من المواقع المطلوبة أو المستهدفة (ذات الهدف المحدد) على طول المحور قيد الاختبار [3] [4]. وإن عدد الأهداف يعتمد على طول محور الآلة. على سبيل المثال، بالنسبة لمحور آلة حتى طول 2 متر، فإن الحد الأدنى من المواقع المستهدفة (ذات الهدف المحدد) هو خمسة مواقع مطلوبة بالنسبة للمتر الواحد. كل موقع مستهدف يتم العمل فيه بخمس حركات كحد أدنى في كل اتجاه، وتجرى اختبارات مشابهة على كل محور من محاور الآلة، ومن المطلوب أن تتوقف الآلة عند المواقع المستهدفة (ذات الهدف المحدد) على طول المحور في كل مشوار حركة، مع ضمان أن يكون كل من جهاز القياس البصري (المكون البصري) والآلة ثابتين قبل إجراء القياس [5]. كما يحدد ذلك بالنسبة للمحاور التي هي أطول من 2 متر، فيتم قياس كل مشوار (سحبة) حركة مزدوجة الاتجاه بحيث يتم فيها اختيار مواقع الهدف على كل عنصر ناقل للطاقة والقائم بالقياس، أو بفواصل قدرها 250 مم. ومن ثم يتم اختيار محور بطول 2 متر في منطقة العمل الطبيعية، يتم إنجاز خمسة مشاوير (سحبات) حركة ذات اتجاهين [6]. إلا أن إجراءات الاختبارات الستاتيكية هذه تستهلك الكثير من الوقت، وقد تأخذ يوماً أو يومين في أثناء العمل على آلة ضخمة، وهذا يؤدي إلى تعطل مكلف عن العمل ومن ثم إلى انخفاض مستوى الإنتاج.

إن القياسات الديناميكية (الحركية) هي طريقة جديدة لتقييم دقة الآلة [7] [8]. و البرمجيات الديناميكية تلتقط المعطيات بسرعة أي عدة آلاف من النقاط في الثانية على طول محور الآلة [9]، مقارنة مع الحد الأدنى لخمس مواقع بالمتر مقاسة بإجراءات الاختبارات الستاتيكية (الساكنة) [10]. وهي أقل استهلاكاً للوقت. إلا أنه لا توجد حالياً معايير قياس لتقييم أداء الآلة باستخدام المعايير الديناميكية. ويجب أخذ العوامل الآتية بالاعتبار عند المعايرة الديناميكية مثل:

- 1- طول المحور: يجب تحديد طول المحور أثناء الاختبارات.
- 2- الاهتزازات التي تتعرض لها الآلات: إن اهتزازات الآلة يمكن أن تكون أكبر في الآلات الضخمة، وذلك من الاهتزاز الذي تتحمله الأرضية. وهذا سوف يؤثر على قطع تم إنتاجها بدقة ولها علاقة بسعة الاهتزاز.
- 3- تركيب الآلة: إن الأساسات قد تؤثر على استقامة سرير الآلة.
- 4- إجراء الاختبارات: يجب أن تتم الاختبارات في أوقات منتظمة خلال فترات العمل لضمان استمرار الدقة.

أهمية البحث ومواده:

إن الهدف الأساس من هذا البحث هو المعايرة الديناميكية (الحركية) لأخطاء نقل الحركة في آلات التشغيل. وذلك بالفحص والإجراء للاختبارات الديناميكية، وإجراء المقارنة المباشرة مع الاختبارات الستاتيكية (الساكنة)، باستخدام تحول فورييه السريع Fast Fourier Transform (FFT) بغية توفير الوقت والوصول إلى دقة عليا. وكذلك معرفة أفضل في أماكن توضع الأخطاء الهندسية (تحديد المواقع).

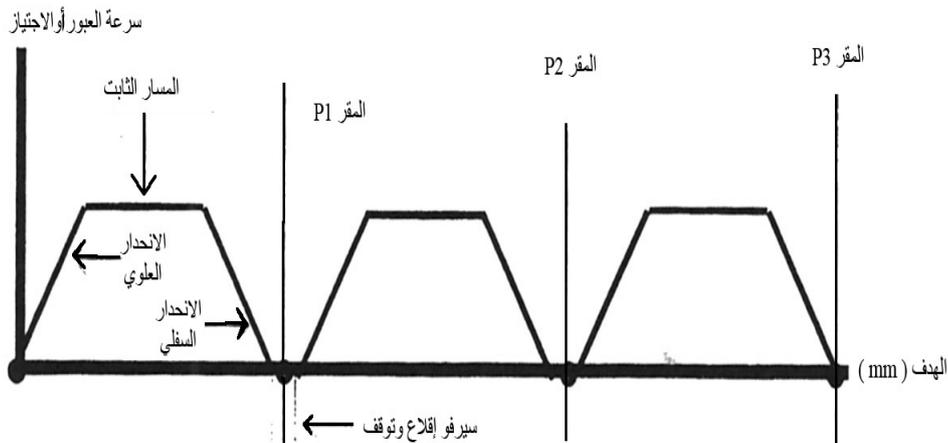
طرائق البحث ومواده :

إن طريقة البحث ومواده تعتمد على إجراء الاختبارات الستاتيكية والاختبارات الديناميكية لأخطاء نقل الحركة في آلات التشغيل باستخدام تحول فورييه السريع (FFT) Fast Fourier Transform باستخدام برمجيات Renishaw، وبرمجيات Haning. حيث تحليل البرمجيات الديناميكية (الحركية) يكون فيه تحول فورييه السريع FFT هو عملية رياضية عامة تُطبَّق للتحقق من مكونات التردد للمعطيات الحركية الملتقطة (المكتسبة) خلال فترة من الزمن. ويمكن أيضاً استخدام هذه العملية لإيجاد الترددات لحركات اهتزازية لمواد قيد الاختبار. لقد تم استخدام الترددات في أخذ العينات اعتماداً على طول المحور وعلى الوقت الذي يستغرقه كل قياس. ومن ثم تم تحويل المعطيات الحركية (الديناميكية) الأولية المسجلة بواسطة مقياس التداخل ليزري إلى معطيات توضع (تحديد المواقع)، والذي تولدت عنه قيمٌ أخطاءٍ وذلك عند تحديد هذه المواقع. بالإضافة إلى الاعتماد على مراجع علمية متخصصة، وبحوث علمية منشورة في مجلات عالمية.

النتائج والمناقشة:

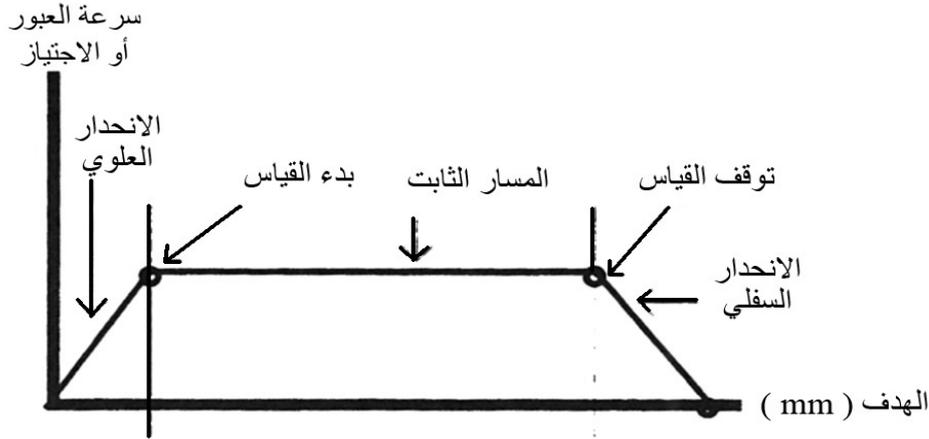
1- عمليات المعايرة:

لقد تمت إمكانية دراسة المقارنة المباشرة بين إجراءات الاختبارات الديناميكية (الحركية) والاختبارات الستاتيكية (الساكنة)، وتم استخدام الترددات في أخذ العينات اعتماداً على طول المحور والوقت الذي يستغرقه كل قياس. وبعد ذلك تم تحويل المعطيات الحركية (الديناميكية) الأولية المسجلة بواسطة مقياس التداخل ليزري إلى معطيات توضع (تحديد المواقع)، والذي تولدت عنه قيم أخطاء في تحديد هذه المواقع. وتم تقديم مقارنات بين الأخطاء الزاوية وأخطاء الاستقامة، وكذلك في دقة تحديد المواقع، وما تجب ملاحظته هنا ألا يكون هناك اختلاف في النتائج فيما بين القياسات الطولية الستاتيكية والديناميكية. ولكن هذا الأمر أثار تساؤلاً عند تحليل الرسومات أو المخططات البيانية المحددة للواقع بالشكلين الستاتيكي والديناميكي. في الاختبارات الستاتيكية تتحرك الآلة إلى كل موقع للهدف المحدد، ومن ثم تتباطأ في السرعة إلى حد التوقف قبل أخذ كل قياس كما هو مبين على الشكل (1) عند المقرات $p1, p2, p3$



الشكل (1) التسارع والتباطؤ لمحور الآلة عند أخذ القياسات الستاتيكية.

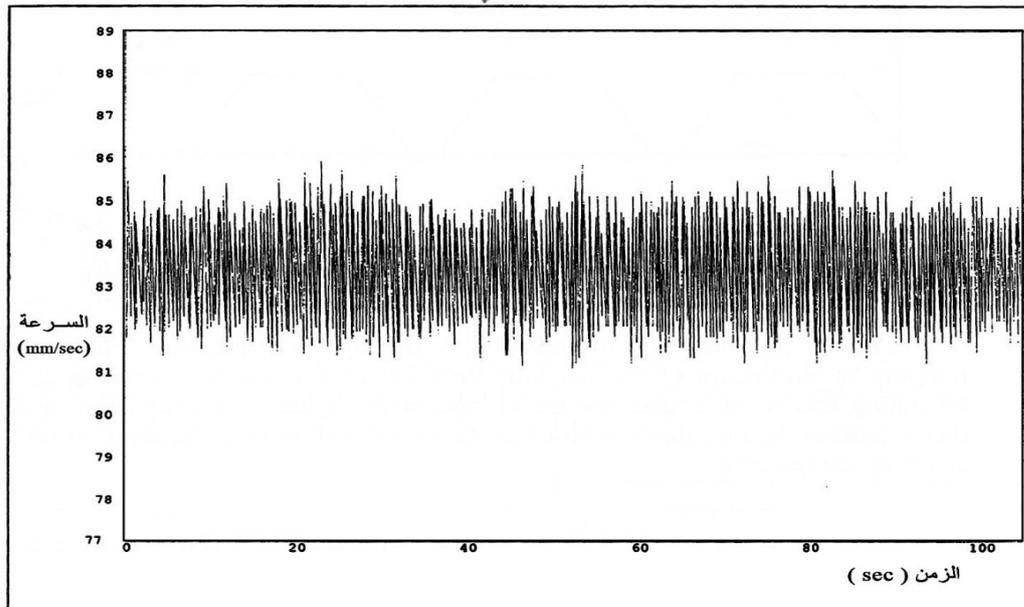
أما عند تسجيل القياسات الديناميكية فتتحرك الآلة بسرعة تغذية ثابتة على كامل طول المحور. ولا بد أيضاً من ملاحظة الانحدارات إلى الأعلى والأسفل قبل أن تصل الآلة إلى معدل التغذية الثابت. إن الانحدار إلى الأعلى وإلى الأسفل في الآلة يحصل هنا لبضع ثوان فقط في البداية والنهاية للمشوار (التنقل) كما يظهر في الشكل (2). والاختبار الديناميكي يقيس موقع الآلة بعد أن تتجاوز حركة المحور الموقع المستهدف (موقع الهدف) بمعدل تغذية ثابت.



الشكل (2) حركة الآلة عند أخذ القياسات الديناميكية

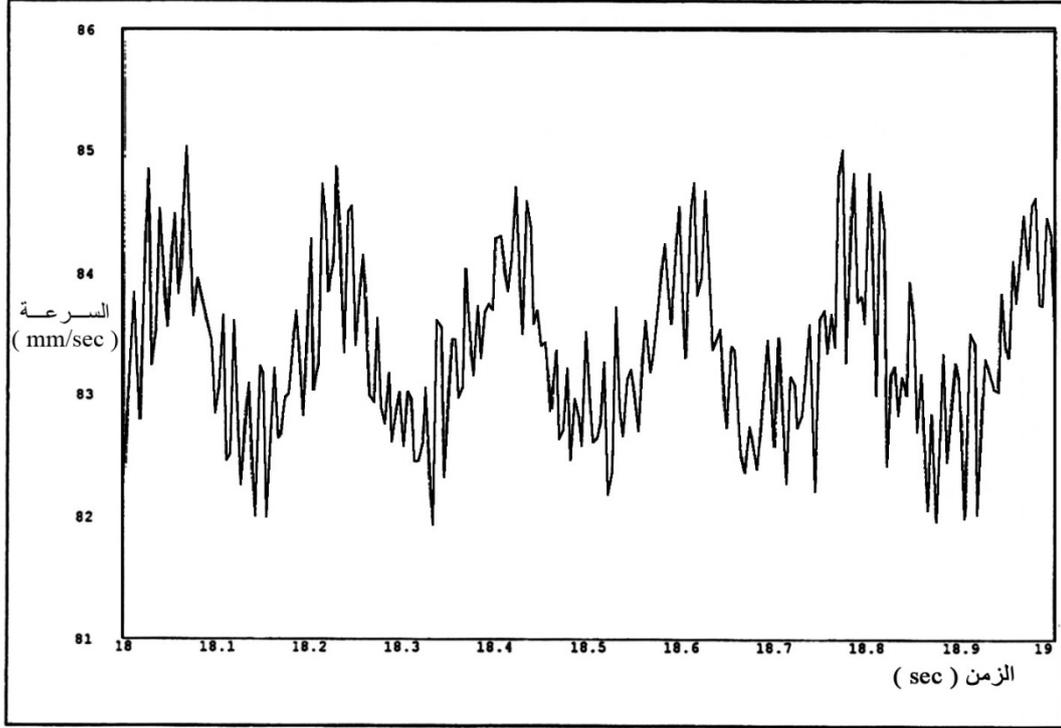
2- تحليل النتائج:

يبين الشكل (3) الرسم البياني السرعة مقدرة بـ (مم/ثانية) مقابل الزمن بـ (ثانية) لقياسات طولية للمحور X1 مأخوذة بمعدل تغذية مقداره 0.5 م/دقيقة، وبمعدل النقاط أو تردد قدره 250 هرتز. حيث يمكن رؤية حزمة من السرعة الثابتة ما بين 81 إلى 86 مم/ثانية. وتكون السرعة العظمى هي 85.9 مم/ثانية عند الزمن 22.8 ثانية، والسرعة الدنيا هي 81.1 مم/ثانية عند الزمن 52.2 ثانية، وقد تم تسجيل مشوار حركة واحدة باتجاهين اثنين.



الشكل (3) القياس الديناميكي الخطي للمحور X1 عند معدل تغذية 0.5 م/دقيقة

ومن ثم نستعرض عبر النوافذ البرمجية في التحليل لفترة زمنية لا تزيد عن ثانية واحدة أي بين الثانية 18 والثانية 19. وبمعدل التقاط أو تردد قدره 250 هرتز، وتكون السرعة العظمى 85 مم/ثانية عند الزمن 18.1 ثانية، والسرعة الدنيا هي 81.3 مم/ثانية عند الزمن 18.3 ثانية، كما هو موضح في الشكل (4)، حيث يوضح الرسم البياني أن هناك ما يزيد عن خمسة أحداث دورية (ادوار) واضحة في هذا المقياس لفترة هذه الثانية الواحدة.



الشكل (4) القياس الديناميكي الخطي للمحور X لفترة زمنية (ثانية واحدة).

إن إجراء هذا التحليل تم باستخدام برمجيات Renishaw النظامية مع المعطيات الحاصلة لتحويل فورييه السريع (FFT) Fast Fourier Transform .

ففي تحليل البرمجيات الديناميكية يكون تحويل فورييه السريع FFT عملية رياضية عامة تُطبَّق للتحقق من مكونات التردد للمعطيات الحركية الملتقطة (المكتسبة) خلال فترة من الزمن. ويمكن باستخدام هذه العملية إيجاد الترددات لحركات اهتزازية لمادة قيد الاختبار أيضاً.

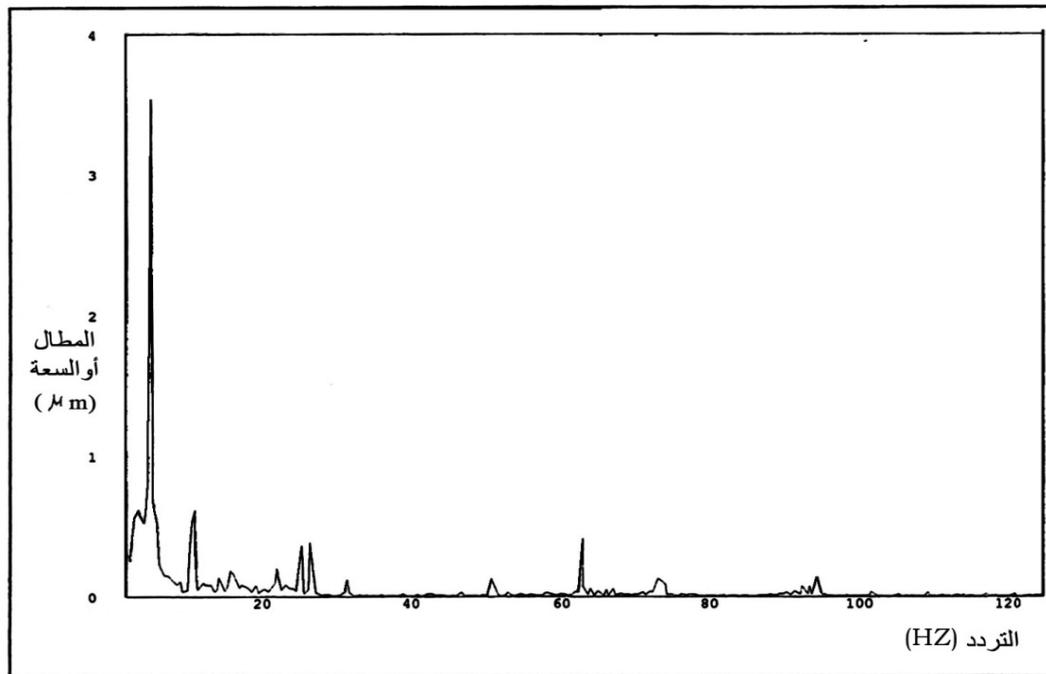
وقد تم في هذا البحث استخدام برمجيات Hanning في تحليل تحويل فورييه السريع FFT أيضاً. لأن الفرق بين البرمجيات المختلفة يكمن في التبادلات الدقيقة بين الأرقام المختلفة للاستحقاق الذي يمكن استخدامه لوصف ضيق ومحدد لتوابع التسرب الطيفي، وأمكنا حساب ذلك من الآتي:

$$w(s) = \frac{1}{w_{ss}} \left| \sum_{K=0}^{N-1} e^{2\pi i s k / N} \cdot \omega_k \right|$$

$$\approx \frac{1}{W} \left| \int_{-N/2}^{N/2} \cos(2\pi sk/N) \omega(k - N/2) dk \right|^2$$

إن التبادل الرئيس يكون بين محاولة صنع ذروة مركزية ضيقة ما أمكن، وتقليل أو تناقص ذيول (خلفيات) التوزيع بأسرع ما يمكن .

إن تحليل تحول فورييه السريع FFT يجري ضمن مجال ترددات بين 3 هرتزات و 60 هرتزاً باستخدام برمجيات للمحور X1 وبمعدل التقاط 250 هرتز والسعة العظمى 3,5 ميكرومتراً عند تردد 5,3 هرتزات كما في الشكل (5). ويتم عادة شطب قيمة الهرتزات الأولية القليلة من وتيرة (روتين) التحليل، حيث تضمينها سوف يعطي خطأ سعة كبيراً جداً يتعلق بحركة الإقلاع البسيطة فقط. إن الرسم البياني الناتج يثبت (يؤكد) استنتاجنا السابق من الشكل (4) الذي يُظهر ذروة سعة ملحوظة تحصل عند حوالي 5.3 هرتزات .



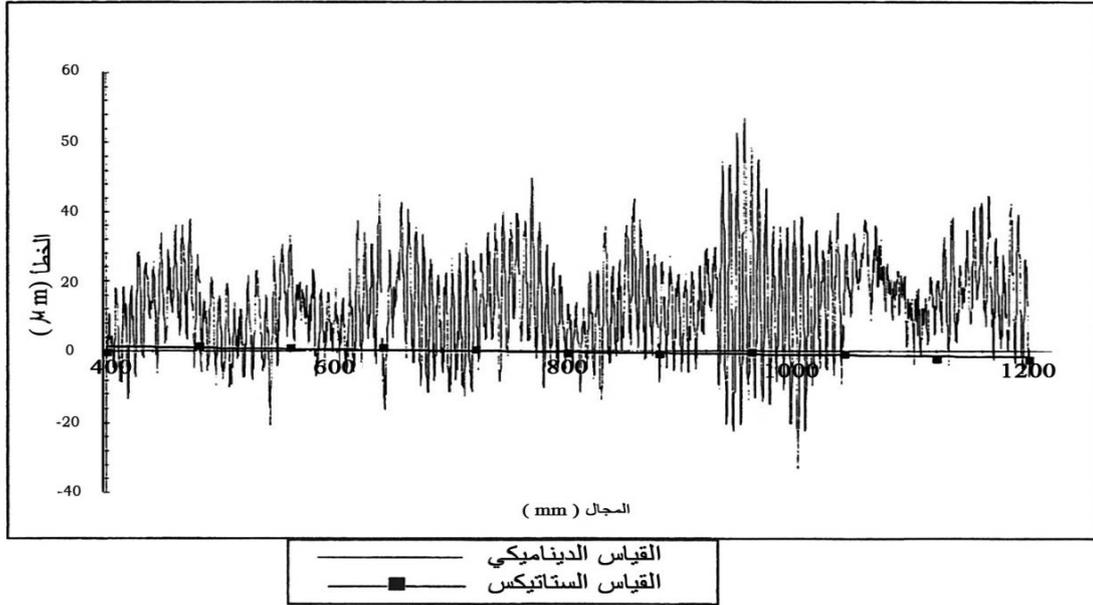
الشكل (5) تحليل تحول فورييه السريع (FFT) لاختبار المحور X1.

لقد تم اختيار المحور بطول 2 متر في منطقة العمل الطبيعية للقياسات الستاتيكية (الساكنة)، وتم إجراء خمسة مشاوير (سحبات) حركة باتجاهين. إن الشكل (6) يُظهر أخطاء التوضع (تحديد مواقع) الستاتيكية والديناميكية على طول المحور X. وتم استخدام المعطيات نفسها، لقد تحولت المسافة على معطيات الزمن إلى خطأ ديناميكي (حركي) مقابل المسافة المقطوعة .

وعند مراقبة مشوار واحد (سحبة) لقياس ديناميكي (حركي) باتجاه واحد، وتم اختيار خمسة مشاوير (سحبات) حركة ذات اتجاه واحد للقياس الستاتيكي تم حساب متوسط خمسة قياسات ستاتيكية وركبت على رسم بياني للقياس الديناميكي على طول المحور 2 متر، لقد تم الحصول على 6014 نقطة ديناميكية (حركية) بالمقارنة مع 55 نقطة

ستاتيكية (ساكنة) فقط. إن الزمن المطلوب الذي استغرق للاختبار الديناميكي (الحركي) كان 24.1 ثانية، بينما كان سيستغرق حوالي 370 ثانية في الاختبار الستاتيكي.

إن الرسم البياني في الشكل (6) يظهر أن نتائج الاختبار الستاتيكي تبقى ثابتة تقريباً، بينما تُلاحظ ساعات كبيرة على الرسم الديناميكي (الحركي)، ومن الممكن رؤية خطأ دوري (حلقي) على الرسم الديناميكي (الحركي) الذي لا يشاهد على نتائج القياس الستاتيكي. ويُظهر الرسم البياني أن متوسط التغير في خطأ تحديد المواقع هو بحدود 30 ميكرومتراً ($30\mu\text{m}$) .

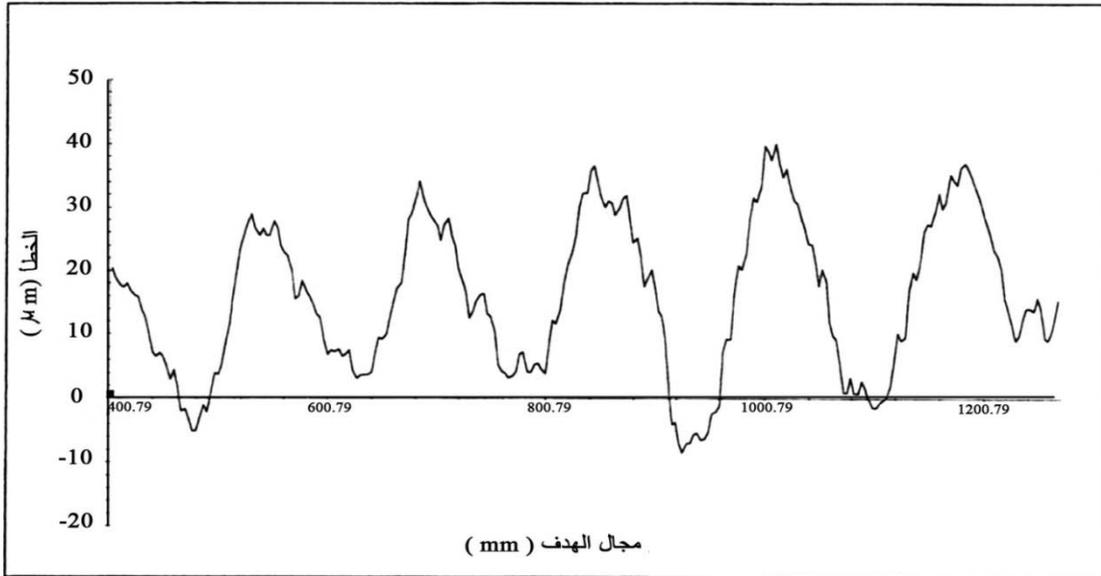


الشكل (6) مخطط تحديد مواقع الخطأ الخطية الستاتيكية والديناميكية.

إن أخطاء تحديد المواقع الستاتيكية قليلة نسبياً، لأن تعويض الخطأ الطولي يتم إدخاله في منظم الآلة على كامل تنقل المحور. لقد تم أخذ القيمة المتوسطة (المعدل المتوسط) على المدى القصير من أصل معطيات القياس الستاتيكية أعلاه، بينما لم تؤخذ القيمة المتوسطة للمعطيات الأولية الديناميكية. وسعة الخطأ الديناميكي أكبر من الخطأ الستاتيكي. وخطأ الجريدة المسننة والمسنة (الترس) بـ 5 هرتز المكتشف في التحليل الديناميكي يمكن أن يتحول إلى أخطاء في التوضع أو في المواقع، وذلك لأن الآلة تتحرك بمعدل تغذية ثابت عند أخذ القياس الديناميكي. إن فحص الآلة أثبت أن الجريدة المسننة والترس المستعملين في تشغيل الآلة لهما خطوة 15 مم. و متوسط سرعة العبور أو الاجتياز الذي يبلغ 83 مم/ ثانية يعطي تعشيق 5.5 أسنان بالثانية الذي يتطابق مع تحليل FFT للتردد السائد (المسيطر) لهذا الخطأ الدوري أو الحلقي .

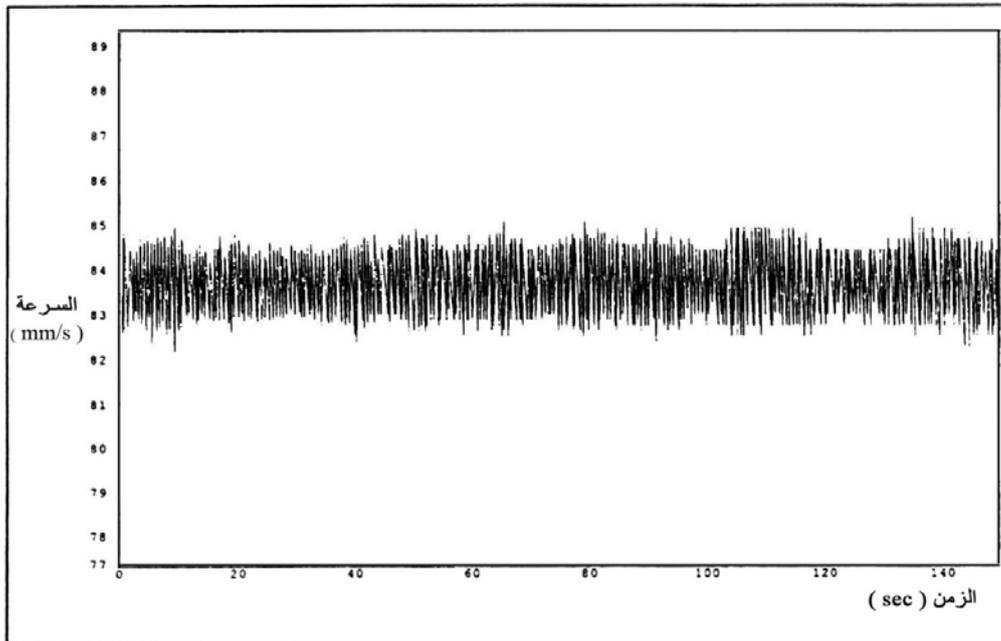
إن الشكل (7) يُظهر التغير في خطأ التوضع (تحديد المواقع) كما يقاس ديناميكياً أو حركياً لفترة ثانية واحدة من الزمن. إن هذا التغير هو نتيجة للسرعة المتغيرة، كما يشاهد في الشكل (3) السابق، عند حركة أو تنقل المحور لـ 86 مم، وهذا يُظهر مرة أخرى أكثر من خمسة أحداث دورية (ادوار). وهذا التغير في خطأ تحديد المواقع يبدو أنه يعكس التغير في السرعة كما يظهر في الشكل (4).

إن تردد الـ 5 هرتز يمكن كذلك أن يكون ذا علاقة بنظام توضع الجريدة المسننة والمسنة المستخدم في الآلة.



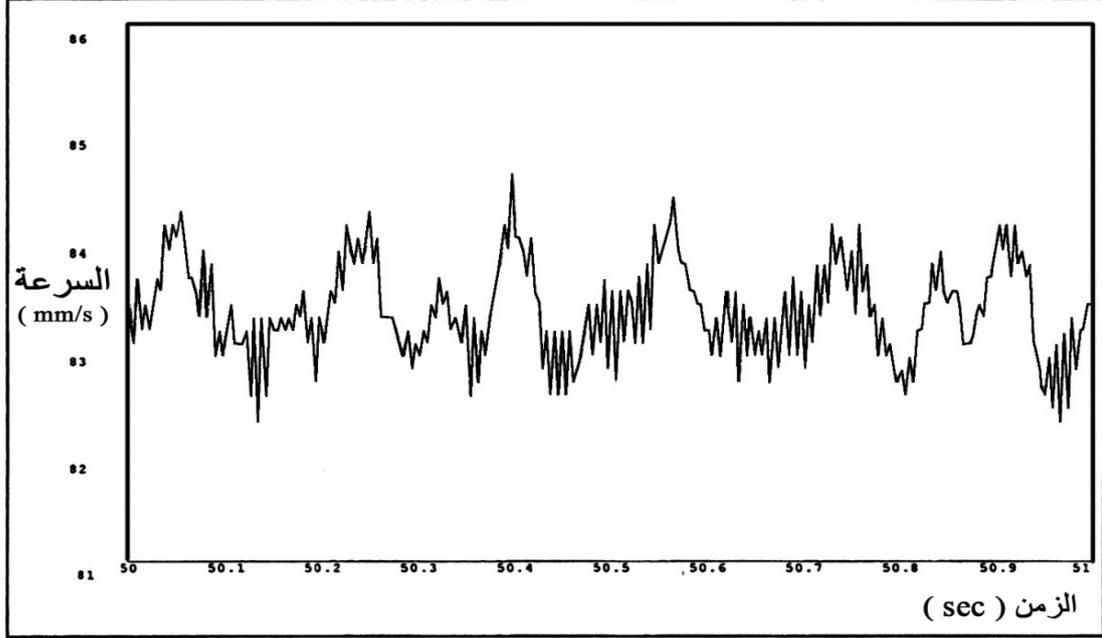
الشكل (7) الخطأ الديناميكي لمشوار (مسافة) الحركة خلال ثانية واحدة .

لقد تم إجراء استقصاءات أخرى على المحور X2. حيث يُظهر الشكل (8) الرسم البياني للسرعة مقابل الزمن المأخوذ بنفس معدل التغذية كما للآلة أعلاه أي 0.5 م/دقيقة. فتبين أن حزمة السرعة الثابتة بين 82-85 مم/ثانية يمكن أن تُلاحظ أيضاً. وهذا يُظهر مرة أخرى أن مقداراً مهماً من الزمن يمكن توفيره عن طريق الاختبار الديناميكي، حيث إن عملية القياس كاملة يمكن أن تتم كذلك في بضع ثوانٍ.



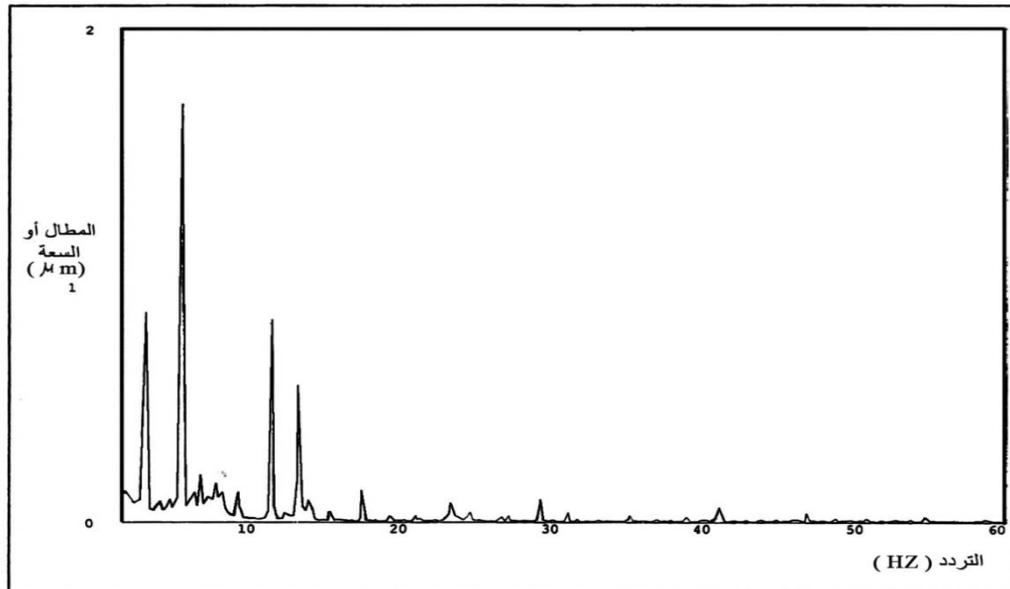
الشكل (8) الخطأ الديناميكي للمحور X2 العمودي .

ويُظهر الشكل (9) استعراض القياس الخطي للمحور X2 من اجل ثانية واحدة لفترة زمنية لا تزيد عن ثانية واحدة أي بين 50 و 51 ثانية، ويُظهر ما يزيد عن 6 أحداث دورية (ادوار)، وتكون السرعة العظمى 84.6 مم/ثانية عند الزمن 50.39 ثانية، والسرعة الدنيا هي 82.29 مم/ثانية عند الزمن 50.13 ثانية، وعند معدل التقاط أو تردد قدره 250 هرتزاً.



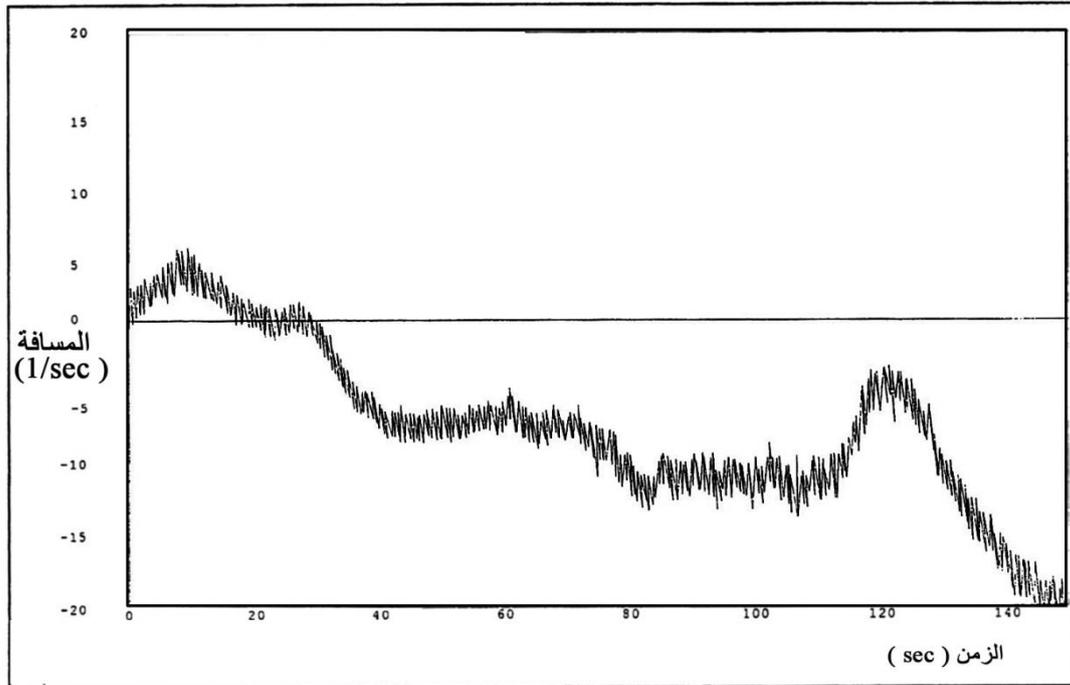
الشكل (9) القياس الخطي للمحور X2 من اجل ثانية واحدة .

ومن ثم تم إجراء أو استخدام برمجية Hanning لتحليل FFT للمحور X2 (الشكل 10) على فترة زمنية قصوى سائدة فأظهرت ذروة سعة ملحوظة بحوالي $1.7\mu\text{m}$ عند 6 هرتزات. وهذا يتطابق مع عدد الأحداث الدورية أو الحلقية الموجودة ضمن فترة الثانية الواحدة من الزمن .



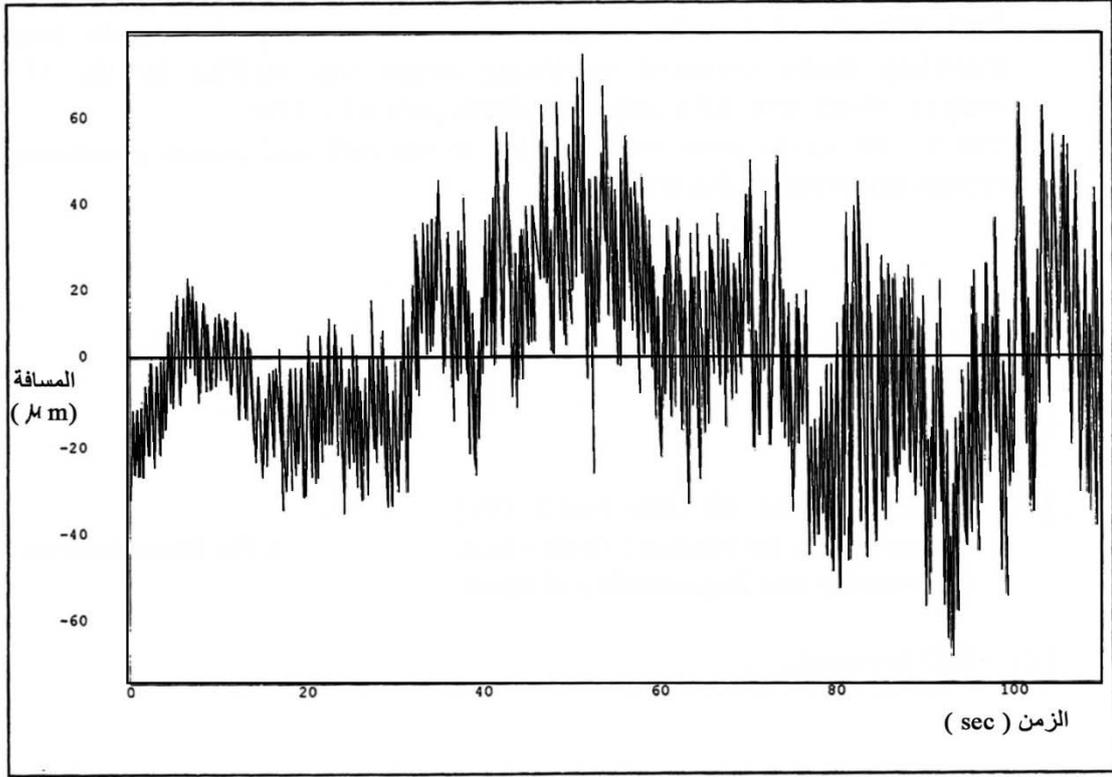
الشكل (10) تحليل تحول فورييه السريع (FFT) باستخدام نافذة Hanning للمحور X2 .

ولأن جميع درجات الحرية (دقة تحديد المواقع، الذروة وأخطاء الانحراف، وأخطاء الاستقامة في سطحي القياس كليهما) هي متساوية الأهمية، فإنه يجب قياسها على طول المحور الطولي أيضاً، ولهذا السبب فإن الاختبارات الديناميكية الزاوية والمستقيمة تم إجراؤها أيضاً على هذه الآلة. ويُظهر الشكل (11) القياسات الديناميكية للخطوة الزاوية مأخوذة على طول الانتقال أو المسار نفسه. وهي بحدود 15 sec^{-1} (15 arc-seconds) لخطأ الخطوة على انتقال الآلة كاملاً .



الشكل (11) القياس الديناميكي الزاوي (الخطوة) للمحور X2.

إن الخطط الموضوعية للحركة الزاوية والمستقيمة على طول المحور تطرح مشكلة مختلفة حيث نحن الآن نقيس درجة استقامة حركة الطاولة. على كل حال، تجب ملاحظة أن اختبارات الاستقامة هي أكثر تحسناً لاضطراب الهواء. وأن عدم التأكد من القياس يتأثر بالتحليل الحاصل في نظام القياس والتقلب العشوائي. والشكل (12) يُظهر نتائج قياس الاستقامة العمودية المأخوذة على نفس الآلة للمحور X2 ، وأن القيمة العظمى هي $70.4 \mu\text{m}$ أما القيمة الدنيا فهي $89.1 \mu\text{m} -$.



الشكل (12) القياسات الديناميكية للاستقامة العمودية للمحور X2.

إن الأخطاء المستقيمة والأخطاء الزاوية يمكن أن تنشأ من توضع (تحديد المواقع) المحور ، ولكنها تحدث في اتجاهات مختلفة.

الاستنتاجات والتوصيات:

- استناداً إلى تحليل النتائج والملاحظات السابقة يمكن التوصل إلى الاستنتاجات الآتية :
- 1- إن القياسات الديناميكية (الحركية) قادرة على كشف الأخطاء التي لم يكن بالإمكان كشفها سابقاً في الاختبارات الستاتيكية.
 - 2- يمكن توفير مقدار مهم من الزمن في حال تنفيذ القياسات الديناميكية (الحركية) .
 - 3- إن وجود 5 أحداث ترددية (أدوار) في فترة ثانية واحدة من الزمن في آلة التشغيل تم التحقق منه بتحليل تحول فورييه السريع FFT الذي أظهر قمة سعة رئيسة مقدارها 5.3 هرتزات .
 - 4- إن الخطأ الترددي (الحلقي) 5.3 هرتزات يمكن أن يكون نتيجة لنظام التوضع بين الجريدة المسننة وبين المسنن المستخدم في الآلة.

المراجع:

- 1-Callaghan, R. *Method for Establishing Machine Tools Performance Specification from Part Tolerance Requirements*. Lampdamp Sixth International Conference and Exhibition on Laser Metrology, Machine Tools, CMM and Robot Performance, July 15- 18, The University of Huddersfield, UK, 2003.
- 2- The American Society of Mechanical Engineering. *ASME, Draft B5. 59 – 1: Data Specification for Machine Tools Performance Tests*, And *ASME, Draft B5. 59 -2: Data Specification for Properties of Machine Tools for Milling and Turning*. ASME, New York, 2006.
- 3- International Organization for Standardization. *International standard Committee Draft ISO/CD 230/ 1.4: Test Cade for Machine Tools – Part1: Geometric Accuracy of Machines Operation Under no- Load or Quasi – Static Conditions*. International Organization for Standardization: Geneva, 2006.
- 4- X. Y. Mao, B. Li, M. Shi, H. Q. Liu, P. G. Li., - *A New Technique for Direction Measuring the Position Errors of a 3 – Axis Machine Part2, Application*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, V35, 2008, pp1085-1089
- 5- Shigeru Hosoe, - *The Development of High Precision Laser Interferometric Displacement Measurement System*, The Japan Society for Precision Engineering, V57, 2009, pp1744-1748.
- 6- *Compensation of Systematic Errors in Five- Axis Machine Tools High- Speed Machining*. International Journal of Production Research. V40, 2010, pp3765-3778.
- 7-Kuang- Cha Fan, His- Ming Chen, Tzu- Hsin Kao -*Prediction of Machining Accuracy Degradation of Machine Tools*, Department of Mechanical Engineering, National Taiwan University, Taiwan, V36, 2012. pp288-298.
- 8- Shih – Ming, Han- Jen Yu, Hung-Wei Liao,. - *A New-High-Effeciency Error Compensation System for CNC Multi – Axis Machine Tools*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, V28, 2008, pp518-526.
- 9 - Huan Lao Liu, Honming Shi, Bin Li, Hui Chin Zhou., - *New method for Computer Numerical Control Machine Tools Calibration*. Frontiers Mechanical Engineering, China, V2, 2007, pp301-304.
- 10- Ergeny Podzharov, Valdimar Syromyatinkov, Julia Potricia Ponce Navarro, Ricardo Ponce Navarro., - *Static and Dynamic Transmission Errors in Spur Gears*. University of Guadalajara, Electromechanical Engineering Department, Mexico, V1, 2008, pp37-41.