مجلة جامعة دمشق للعلوم الهندسية
Damascus University Journal for engineering sciences
المجلد42 العدد (3) – 2026: 205- 218
Vo 42 number (3) -2026: 205-218

تحسين موازنة محاور العنفات الغازية في محطات الطاقة الكهربائية باستخدام برنامج الماتلاب

ميادة فاضل الأحمد*[1] عصام قرقوط[2] وعد عمران [3]

*[1]. طالبة دكتوراه– هندسة تصميم وبناء الآلات– قسم التصميم الميكانيكي –كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية.
myadaalahmad@damascusuniversity.edu.sy

[2]. أستاذ مساعد، دكتور، مهندس – قسم هندسة التصميم الميكانيكي –كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية.
essamkarKout@damascusuniversity.ed.sy

[3]. أستاذ، دكتور – قسم الميكانيك العام –كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية.
waadomra@damascusuniversity.edu.sy

الملخص:

تهدف موازنة الكتل في الآلة إلى حذف ومعاكسة قوى العطالة وعزوم العطالة حيث أن محصلة قوى العطالة وعزوم العطالة المؤثرة على محامل العنفة الغازية تنتقل إلى هيكل العنفة وتتسبب بتحريض ردود أفعال ديناميكية على نقاط استنادها مسببةً اهتزازات ذات انعكاسات سلبية على أداءها واستقرارها. تدعى قوى العطالة هذه بقوى الارتجاج، ومن الضروري الحد من هذه القوى وذلك بعزلها أو تخفيف تأثيرها على العنفة.

يتناول هذا البحث تحسين أداء العنفة الغازية من خلال تقليل تأثير الاهتزازات على محاملها وخصوصاً الاهتزازات الناتجة عن عدم توازن الأجزاء الدوارة المكونة للعنفة وذلك باستخدام تقنيات حديثة (طريقة الشعاع الفعال) حيث تم نمذجة هذه الطريقة باستخدام برنامج الماتلاب بهدف الحصول على برنامج موازنة وتقديم مبادئ أساسية لعملية الموازنة الديناميكية للعنفات الغازية في الموقع من أجل زيادة الخبرات العملية في هذا المجال.

الكلمات المفتاحية: العنفات الغازية – الموازنة – الاهتزاز – الشعاع الفعال–الماتلاب.

تاريخ الإيداع: 2023/9/10
تاريخ القبول: 2023/10/27

حقوق النشر: جامعة دمشق – سورية، يحتفظ المؤلفون بحقوق النشر بموجب **CC BY-NC-SA**

http://journal.damascusuniversity.edu.sy/index.php/index/index
ISSN (online): 2789-6854

Balancing axes of gas turbine in electric power plant by using MATLAB program

Myada Fadl Alahmad*[1] Essam KarKout[2] Waad Omran[3]

*[1].PHD student- Eng, Mechanical Design Engineering Department- Faculty of Mechanical and Electrical Engineering.
myadaalahmad@damascusuniversity.edu.sy

[2]. Assistant Professor, Dr, - Mechanical Design Engineering Department Faculty of Mechanical and Electrical Engineering.
essamkarKout@damascusuniversity.ed.sy

[3]. Professor i- Prof, Dr, General Mechanical Department- Faculty of Mechanical and Electrical Engineering.
waadomra@damascusuniversity.edu.sy

Received: 10/9/2023
Accepted: 27/10/2023

Copyright: Damascus University- Syria, The authors retain the copyright under a CC BY- NC-SA

ABSTRACT:

The balancing of masses in the machine aims to eliminate and reverse inertial forces and inertia moments, as the resultant inertial forces and inertia moments affecting the gas turbine bearings are transmitted to the turbine structure and cause dynamic reactions to be incited on its points of support, causing vibrations with negative repercussions on its performance and its stability. These inertia forces are called vibration forces, and it is necessary to reduce these forces by isolating them or mitigating their effect on the turbine

The performance of the gas turbine can be improved by reducing the vibrations on its bearings, especially the vibrations resulting from the imbalance of the rotating parts that make up the turbine, by using modern techniques (the effective vector method) this method was modeled using MATLAB in order to obtain a balancing program to Presenting basic principles of the dynamic balancing process of gas turbines on site in order to increase practical experiences in this field.

Keywords: gas turbines - balance - vibration - effective Vector- MATLA

المقدمة:

تعتبر الموازنة الديناميكية واحدة من أهم أعمال الصيانة في المعامل الإنتاجية وذلك لأن تحقيق الموازنة في الآلات الدوارة يعني تشغيلا آمناً وسليماً لتلك الآلات مع زيادة في العمر التشغيلي وتقليل التوقفات. ومنذ أن تم اختراع المحور الدوار أخذ بعين الاعتبار توزيع الكتل بالتساوي والتناظر حول محور الدوران من أجل تقليل القوى الديناميكية المتولدة في الآلة. أما في الوقت الحاضر فهناك اهتمام كبير جداً ومتزايد بالموازنة الديناميكية يشمل طيفاً واسعاً من المعدات والأجزاء الدوارة وخاصة الموازنة الديناميكية للعنفات الغازية في محطات توليد الطاقة الكهربائية والغاية من ذلك هو ضمان تشغيل سليم خالٍ من العيوب والضوضاء.

إن السبب الأكثر انتشارا" لاهتزاز العنفة هو عدم توازن المحور والذي يُعرف بأنه الخلل الحاصل في توزيع كتلة المحور بالنسبة إلى خط الدوران الهندسي الذي ينشأ للأسباب التالية:

الأول: عدم تطابق خط الدوران العام الواصل بين مراكز ثقل المقاطع المنفصلة مع خط الدوران العام الواصل بين المراكز الهندسية المنفصلة لهذه المقاطع والأجزاء(المكونة للمحور) وذلك بسبب:

التوزع غير المتجانس لكل من الكتلة والعزم الناتج عن التفاوتات المتبقية عند صناعة الريش (أي عدم انتظام توزع كتلة المعدن ضمن الريشة حيث تبقى بعض الفوهات ضمنها تسبب عدم توازن).

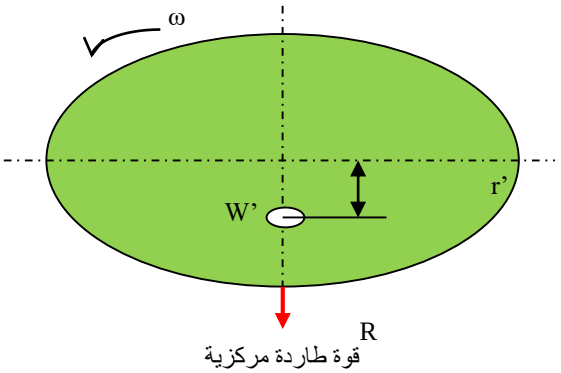
عدم التناظر عند توزيع الريش المرتبطة مع المحور.

الثاني: عدم توازن المقاطع والأجزاء المكونة للمحور مع بعضها بالنسبة لمركز الدوران أي إزاحات مختلفة وغير متساوية لمراكز ثقل هذه المقاطع والأجزاء عن مركز الدوران مثل حالة انحناء المحور (خلل في المحور الناتج عن التوزيع غير المتساوي للإجهادات في أجزاء المحور عند الانكماش الحراري للمحور).

إن عدم التوزيع المنتظم لكتلة المحور الكلية أثناء دورانه تسبب ظهور قوى تحريض تساوي القوة الطاردة المركزية للكتلة غير المتوازية R والتي تحدد بالعلاقة التالية كما في الشكل (1):

$R = r.\ m.\omega^2$ حيث أن:

$m = M/g$: كتلة عدم التوازن وتقاس بواحدة $\frac{kg.s^2}{cm}$



الشكل (1) يبين مخطط قوة عدم توازن المحور.

M: كتلة عدم التوازن وتقاس بواحدة kg .

g : قوة تسارع الجانبية الأرضية وتساوي $9{,}8m/s^2$

r: بعد مركز ثقل كتلة عدم التوازن عن محور الدوران وتقاس بواحدة cm .

ω: السرعة الزاوية للدوران وتساوي $\omega = \frac{3{,}14.n}{30}$ وتقاس بواحدة 1/s

n:عدد دورات المحور وتقاس بواحدة دورة /دقيقة

تنشأ ظاهرة عدم توازن المحور في المراحل التالية:

مرحلة التصنيع: عملية موازنة المحور الستاتيكية والديناميكية غير كافية.

مرحلة التركيب: تركيب العنفة على القواعد غير دقيق أو أبعاد القواعد نفسها غير دقيقة.

مرحلة التجميع: لم يُجرى الاختبار الصحيح للشفرات المتحركة المطلوب تبديلها بشكل إفرادي أو عدم تثبيت السلك الرابط أو الأجزاء والمكونات الأخرى بشكل جيد.

مرحلة التشغيل: ويعود إلى عدم المراقبة أثناء العمل لأداء وحدة العنفة ومنها الاهتزازات والتي تؤدي بالتالي إلى تحطم الشفرات العاملة المتحركة أو صفيحة تثبيت الشفرات.

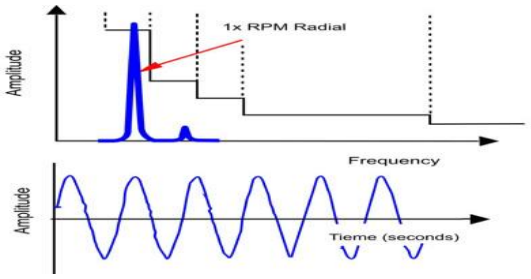
خواص اهتزازات عدم التوازن:

1- تردد الاهتزاز متوافق مع تردد الدوران.

2- اهتزازات عدم التوازن تبقى ثابتة مع إمكانية تكرارها

3- (إذا لم يحدث تغير في العناصر المختلفة للجسم الدوار ولم يحدث أي تغير في المحاذاة فإنه سيتم تكرار كل من سعة وطور الدوران).

4- تتعلق سعة الاهتزاز بمقدار عدم التوازن الحاصل.



الشكل(2) يبين شكل موجة الاهتزاز الناتج عن عدم التوازن

مفهوم السرعة الحرجة:

السرعة الحرجة للجسم الدائر تساوي التردد الطبيعي وتسمى سرعة الرنين.

التردد الطبيعي(الذاتي):

هو التردد الخاص بالعناصر (لكل عنصرا لتردد النوعي أو الذاتي الخاص به).

سرعة الرنين (الطنين): تخضع الآلات لسرعة مساوية لترددها الطبيعي المعرض للطنين مسببة لتضخم الترددات . والسرعة الزاوية التي يحدث عندها هذا الطنين تدعى السرعة الطنينية (الحرجة) W_{cr} وتُحسب بالعلاقة التالية :

$$W_{cr} = \sqrt{\frac{k.g}{w}}$$ حيث

W_{cr}: السرعة الزاوية الحرجة.

ω: السرعة الزاوية .

W: وزن المحور g : تسارع الجاذبية .

K : عامل صلابة المحور

ان الدراسات والبحوث التي تناولت دراسة اهتزازات المحاور الدوارة ومسبباتها وكيفية السيطرة عليها كثيرة ،بعضها ذات طابع نظري وأخرى اتسمت بالطابع التطبيقي .

فقد أجرى الباحثان (Stanway R&JOReilly) [1]

دراسة في محاكاة النظام من أجل السيطرة على الاهتزازات العرضية المتولدة في نظام العمود الدوار –المحمل باستخدام التغذية الإرجاعية لمتجهات الحالة بعد تحديد قيم آيكن في نظام الدارة المغلقة الاستقرارية.

كماقدم الباحثون"-(J. M. Krodkiewski,et al-2008) 2-3] [نموذج لمحمل فعال (موازن)للضبط الذاتي يقوم بالسيطرة على الاهتزازات المتولدة من عدم الاتزان ويتصف هذا الموازن ذي الضبط الذاتي بعدم الحاجة إلى معرفة معلمات(parameters) النظام مسبقا".

كما أجرى الباحثون أعلاه دراسة تحليلية وقدموا نموذجا" رياضيا" لنظام الدوار –المحمل بإدخال نوع آخر من المحامل الزيتية وهو المحمل الزيتي الفعال (Active Oil Bearing) والذي يعمل على اخماد الاهتزازات جراء فعالية الضغط الهيدروليكي المسلط عليها بواسطة مضخة هيدروليكية مسيطر عليها .

قدم الباحثان (Shiyu Zhou & Jianj Shi) [4-6]

سلسلة من البحوث والدراسات في مجال الموازنة الفعالة أثناء فترة التشغيل فقد تمت الموازنة بالاعتماد التقريب بطريقة أصغر المربعات

(Least square estimation) لحالة عدم التوازن في النظام ليكون التقدير سريع التقارب.

وقدم نفس الباحثان نظاماً للموازنة الفعالة لعمود دوار صلب أثناء فترة التشغيل باستخدام الموازن ذي المستوي الواحد يقوم بتخفيض الاهتزازت إذ استخدما استراتجية الموازنة المثلى (Optimal balancing strategy)

كما قام نفس البحثان المذكوران بتطوير واستخدام مراقب متغير مع الزمن(Time varying observe) لتقدير قيمة عدم التوازن أثناء التشغيل وتركز عمليهما على الفترة الانتقالية على أساس تحليلي لمعرفة عدم التوازن للنظام .

كما طور الباحثون (Zhou S.,Shin K.,Dye S.W.,Shi J.& Ni J) [7] عدة طرق للموازنة الفعالة خلال فترة التشغيل اذ تم استخدام الموازن الكهرومغناطيسي في إيجاد الموازنة الفعالة اعتمادا" على استراتجية جدولة الكسب إذ يتم إيجاد قيم معاملات التأثير الآنية (عوامل تأثير ارتجاج الزيت للمضجع أثناء الدوران)عند سرعات مختلفة وخزنها وجدولتها ثم اعتمادها لغرض تخفيض الاهتزازات .

الهدف:

يتمثل هدف هذا البحث في تحسين طريقة الشعاع الفعال المستخدمة في موازنة محور العنفة الغازية باستخدام برنامج

الماتلاب عن طريق نمذجة معادلات المستخدمة في هذه الطريقة للحصول على برنامج يمكن استخدامه للموازنة ضمن الموقع بحيث يستطيع عمال الصيانة إدخال التعليمات الأساسية المطلوبة لعملية الموازنة مما يوفر جهد إجراء الحسابات الرياضية لحساب كتلة الموازنة وموقعها. ومن جهة أخرى يمكن الاستفادة من هذا البرنامج للاستغناء عن أجهزة الموازنة غالية الثمن باستخدام أجهزة قياس اهتزاز بسيطة.

طريقة الموازنة بالشعاع الفعال:

يمكن استخدام هذه الطريقة لحساب الوزن الذي يجعل المحور متوازناً حيث تحدد هذه الطريقة:

. مكان عدم التوازن

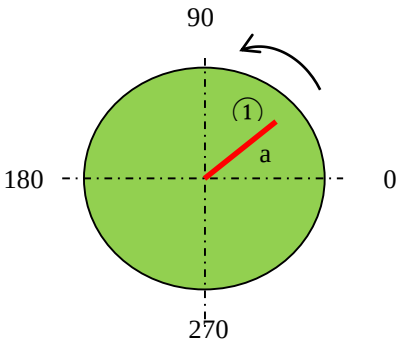
. مقدار عدم التوازن

يجرى تصحيح التوازن لسطح ما باستخدام طريقة الشعاع الفعال وفق الخطوات التالية:

الخطوة1: نشغل بسرعة دوران اختيارية.

يتم التأكد من أن الاهتزاز أصبح مستقراً ثم تؤخذ بيانات الاهتزاز وتدون طويلة الشعاع وزاويته.

مثلا: تؤخذ نتائج قياسات الاهتزاز التجريبية للتشغيل عند الزاوية 45 والطويلة a (µ m) يرسم شعاع الاهتزاز (a) كما هو موضح في الشكل (3)



الشكل (3) يوضح الشعاع الاهتزاز a

الخطوة 2: تحديد قيمة الوزن الثقل التجريبي ومكانه اعتماداً على العلاقة التالية:

$$W = \frac{1}{4} \cdot \frac{G.A}{r}$$

حيث:

W: وزن تجريبي (Kg)

G: وزن المحور (Kg)

A: نصف قطر السطح المصحح (mm)

r: السعة(طويلة الشعاع(µ m))

$\frac{1}{4}$ معامل التصحيح من الضروري ربط ثقل تجريبي بحيث تكون قيمته كافية للحصول على نتائج مقنعة، ويجب أن لا نجعل المحور يولد اهتزازاً زائداً عند السرعة الحرجة.

مكان وضع الثقل التجريبي:

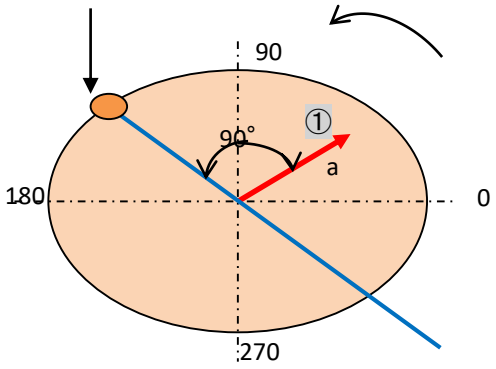
يمكننا وضع الثقل في أي موضع ولكن من المستحسن وضع الثقل في مكان بحيث تنخفض السعة إلى الحد الأدنى.

ملاحظات على وضع الثقل التجريبي:

عندما تكون السرعة أقل بكثير من السرعة الحرجة يوضع الثقل التجريبي في مكان معاكس لشعاع الاهتزاز.

عندما تكون السرعة قريبة من السرعة الحرجة يوضع الثقل بمكان متأخر بمقدار 90° عن شعاع الاهتزاز.

عندما تكون السرعة أكبر من السرعة الحرجة يوضع الثقل بنفس اتجاه شعاع الاهتزاز.



الشكل (4) يوضح مكان الوزن التجريبي

الخطوة 3: يوضع الثقل على مستوي الموازنة المبين في الشكل(4) ويدار المحور بأي سرعة دوران اختيارية.

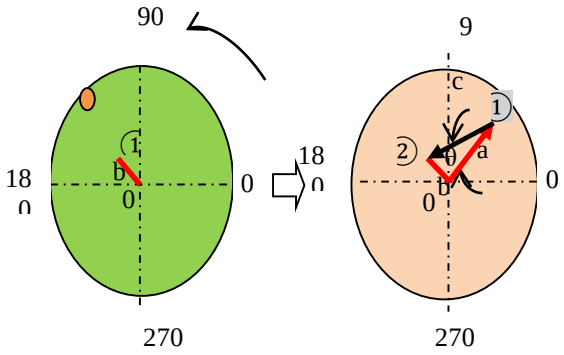
تؤخذ بيانات الاهتزاز (تغيرات السعة والطور) ويرسم مخطط شعاعي وبالاعتماد على هذا المخطط تُحدد أشعة الاهتزاز قبل وبعد وضع الوزن ويُحسب الشعاع المؤثر.

نتائج القياسات بعد وضع الوزن التجريبي مثلا:

- الزلوية 165°

- الطويلة µm
- شعاع الاهتزاز b

فيكون الشعاع C (الذي يتجه من 1 الى 2)هو الشعاع المؤثر (الفعال) وعند ربط الوزن تتغير الزاوية بمقدار θ وشعاع الاهتزاز (a) كما هو موضح في الشكل (5)



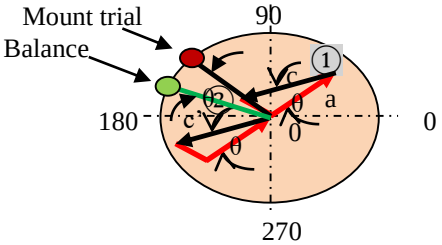
الشكل(5) يوضح الشعاع الفعال

الخطوة 4: اعتماداً على الحسابات في الخطوة (3) يتحدد مقدار الثقل الموازن بحيث يمكننا إلغاء شعاع الاهتزاز كما يلي:

حساب مقدار الثقل الموازن (الكتلة المصححة)

- مقدار الثقل الموازن = $\frac{a}{c}$ X مقدار الثقل التجريبي.
- a شعاع الاهتزاز(µm)الناتج عن التشغيل للمرة الأولى.
- C طويلة الشعاع الفعال (µm)
- زاوية التصحيح θ : تكون بين الشعاعين

(a و c) حيث يتم رسم شعاع موازي للشعاع الفعال c من المركز (o) وامتداد للشعاع a لقياس الزاوية بينهما(θ) وبالتالي تتم الموازنة بإزاحة أو تحريك الوزن بالزاوية θ كما هو مبين في الشكل (6).



الشكل(6) يبين مقدار الزاوية θ و مكان الثقل الحقيقي.

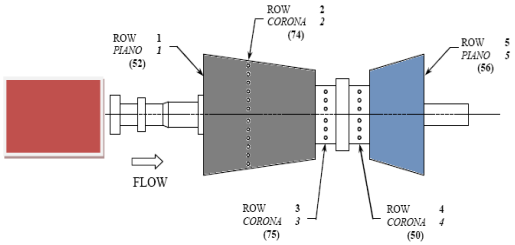
وهذه الزاوية تغير زاوية الشعاع الفعال عند ربط الثقل التجريبي (ولكل جسم دائر زاوية مختلفة).

استخدام طريقة الشعاع الفعال لموازنة محاور العنفات الغازية:

المشكلة العملية في مشروع البحث:

عند تركيب قطع تبديل جديدة لمحور العنفة الغازية ينتج زيادة الاهتزاز على محاملها عن الحد المسموح به، مما يؤدي إلى خروج العنفة عن الخدمة نتيجة عدم توازن المحور، وهو من الأعطال الأكثر تعقيداً نتيجة قلة الخبرة في موازنة المحور ضمن الموقع، بالإضافة إلى عدم توفر الأجهزة والبرامج الحديثة اللازمة للموازنة لحل هذه المشكلة.

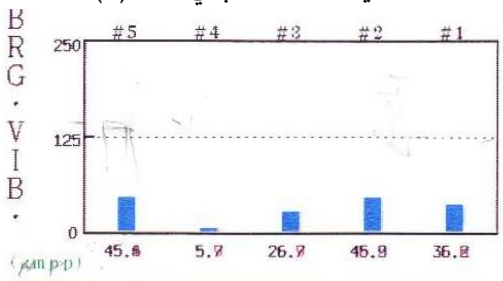
جرى أخذ محور المولدة للعنفة الغازية الأولى ذات الطراز 701D كعينة للدراسة في هذا البحث كونها كانت تعاني من مشاكل اهتزازية أثناء عملية التشغيل. ونتيجة عدم القدرة على حل هذه المشاكل عند سرعة 3000 rpm جرى استبدال المحور من قبل فريق الصيانة، وعند التركيب والإقلاع ظهرت مشاكل اهتزاز على المحمل الرابع نتيجة عدم التوازن.



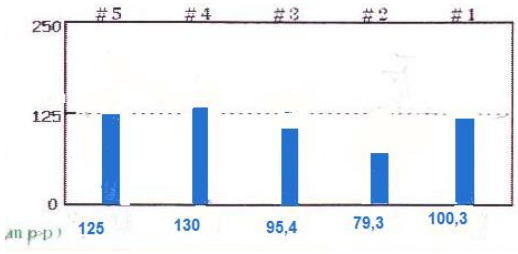
الشكل (7) يبين محور العنفة المدروسة.

تتوضع العنفة الغازية على خمسة محامل:

- محمل قطري (journal bearing) عدد(2)
- محمل دفعي محوري (thrust bearing) عدد(1)
- محمل قطري للمولد الكهربائي عدد (2)



الشكل (8) يبين قيم الاهتزاز الطبيعية على محامل المحور



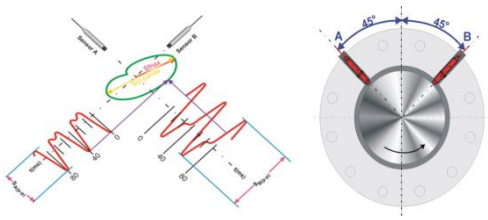
الشكل (9) يبين ارتفاع قيم الاهتزاز على المحمل الرابع

من خلال المخطط يلاحظ ارتفاع الاهتزاز على المحمل الرابع عن حده المسموح مما أدى إلى خروج العنفة عن الخدمة، وبالتالي يحتاج هذا المحمل إلى موازنة بالمستوي القريب منه.

الشكل (10) يبين المحمل المهتز ومستوي الموازنة القريب منه

الشكل(11) يبين مستوى الموازنة ومكان توضع كتل الموازنة.

توضع الحساسات على المحامل

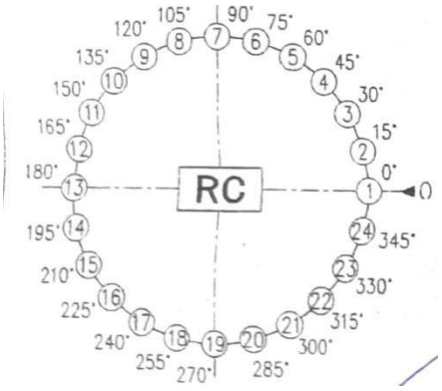


هناك نوعين من الحساسات:

حساسات الاهتزاز النسبي: والتي تحدد مجال اهتزاز المحور في قلب المضجع.

حساسات الاهتزاز المطلق: والتي تحدد انتقال حركة المضجع مع الوحدة كلها، وهي تتوضع على المضجع الدفعي لأنه يتلقى صدمات دوران المحور مع الوحدة كلها ويمنع الانحراف المحوري لمحور العنفة.

بالتالي يمكن القيام بالإجراءات اللازمة لتقليل الاهتزاز على المحمل الرابع بدراسة وتحليل الاهتزاز الحاصل واستخدام طريقة الشعاع الفعال.



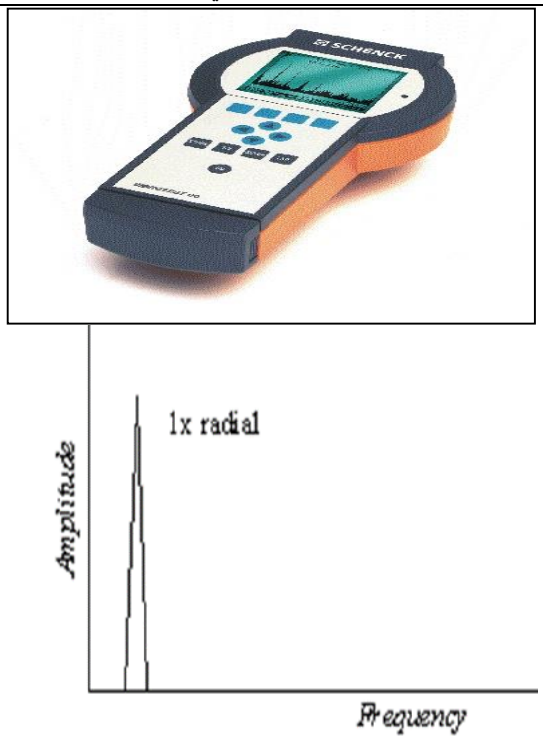
الشكل (12) يبين مستوى الموازنة RC لمحور العنفة الغازية

أنصاف أقطار مستويات الموازنة على المحور المدروس:

الجدول(1) يبين أنصاف أقطار مستويات الموازنة

	EE	RC	PM	CE
نصف قطر مستوي الموازنة	840#	580#	450#	380#
مقاس البرغي (الوزن) weight size	M10	M8	M6	M12
عمق البرغي thread depth	25	30	12	40
عمق الحفر drill depth	35	-	18	-

جرى استخدام جهاز قياس الاهتزاز وتحليل الاهتزاز العالي وهو جهاز vibrotest 60 حيث تم قياس موجة الاهتزاز كما في الشكل(13) وهذا يدل على وجود عدم توازن في المحور.



الشكل (13) يبين شكل جهاز vibrotest 60 وشكل موجة الاهتزاز

حساب الوزن التجريبي:

حسب العلاقة: $MMR = \frac{PRU \times M_{rotor}}{R_t}$

MMR: كتلة الموازنة الأعظمية للمحور.

PRU: هي كتلة الموازنة المتبقية لكلkg .

M_{rotor} : وزن المحور (kg).

R_t: نصف قطر الموازنة.

تحصل على قيمة URP من الاستندرات العالمية للموازنة ISO الجدول الأول نأخذ قيمة G= 2.5 للعنفات الغازية التي سـرعة دورانها 3000 rpm

نقاطع سـرعة الدوران مع المنحني G تحصـل على قيمة 0.4

$PRU = (\frac{g.mm}{kg})$

حيث وزن المحور M_{rotor} =10000 kg

ونصف قطر دائرة الموازنة 560 mm

نطبق القانون:

$MMR = \frac{0.4 \times 10000}{280}$=14,2 g

لكن يعطى الوزن للتجريبي بالعلاقة التالية:

M_t=10× $MMR = 142g \approx 140$ g

حيث :

M_t: الوزن التجريبي.

ويوضـع الثقل التجريبي حسـب السـرعة الحرجة للمحور فاذا كانت سـرعة الدوران للمحور أعلى من السـرعة الحرجة فيوضـع بمكان متأخر بزاوية 90 درجة

بنفس اتجاه شعاع الاهتزاز حيث السرعة الحرجة للمحور العنفة الغازية 1500rpm بينما سـرعة دوران العنفة 3000 rpm لذلك نضع الوزن متأخر بزاوية 90^o

ايجاد مكان توضع الوزن التجريبي:

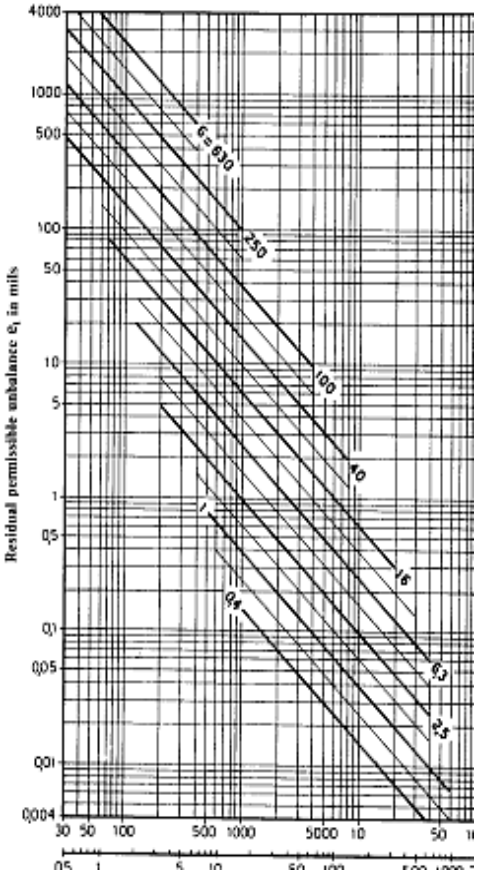
$\varphi_t = \varphi_0 + 90^\circ = 125^\circ + 90^\circ$

$\varphi_t = 215^\circ$

حيث:

φ_t: زاوية الطور للوزن التجريبي.

φ_0 : زاوية الطور عند الاهتزاز العالي.



الشكل(14) يبين مخطط المقياس العالمي لموازنة المحاور[14]

الجدول(2) يبين قيمة درجة عدم التوازن للآلات الدوارة

نوع الآلة " المحور "	اللاتوازن المكافئ	درجة نوعية الموازنة G Grade $\frac{mm}{s}$
الجيروسكوبات ، المغازل ، الأقراص و دوار المولد " المتحرض " لمسننات بالغ الدقة .	0.4	G = 0.4
المتحرضات الكهربائية الصغيرة مع متطلبات الموازنة بمستوى عالي. آلات التسجيل على شريط مغناطيسي و الفونوغراف (الحاكي ، الفونوغراف) الذي يقود خط الإسقاط لفيلم سينمائي وقيادة آلات الطحن العالية الدقة . المحاور الدوارة للعنفات و الضواغط للمحركات النفاثة عالية السرعة. المحاور الدوارة للعنفات البخارية مع متطلبات الموازنة بمستوى عالي.	1.0	G = 1.0
المحاور الدوارة للعنفات الغازية و البخارية، و المولدات الكهربائية العنفية، و المنفاخ التوربيني و المضخات العنفية.عنفات الرئيسية للسفن التجارية .الشواحن، و ضواغط الرشف من أجل السفن الهوائية. متحرض المحرك، دوارات المولدات الكهربائية الصغيرة مع متطلبات الموازنة بمستوى معقول معتدل، و من أجل أداة كهربائية داخلية بجودة عالية ومثاقب طبيب الأسنان.	2.5	G = 2.5

نستخدم طريقة الشعاع الفعال كما يلي:

الخطوة الأولى: نرسم شعاع الاهتزاز العالي (الشعاع الأحمرa) الذي تبلغ قيمته

$v_{0=}$ 135 µm بزاوية الطور 125°.

ونضع الوزن التجريبي متقدم بزاوية 90° درجة أي على الزاوية 210°.

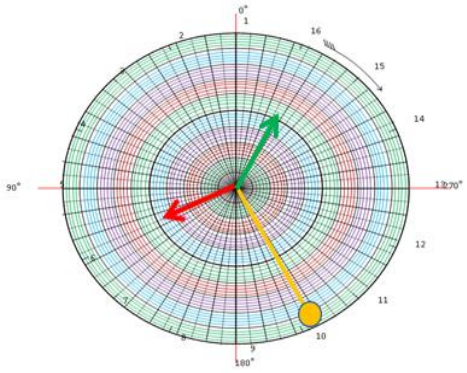
لأن السرعة الحرجة للمحور المدروس هي 1500 rpm وبالتالي حسب قوانين هذه الطريقة نضع الوزن التجريبي متقدم بزاوية 90°درجة.

نحصل على شعاع آخر للاهتزاز (الشعاع الأخضرb) الذي تبلغ طويلته

- v_b =144µm عند زاوية الطور 338°.

الخطوة الثانية: تصل بين الشعاعين تحصل على الشعاع الفعال (الشعاع الأزرقc)

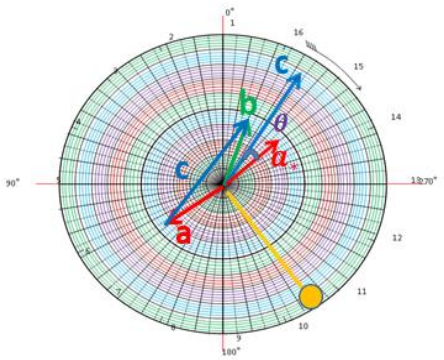
effect vector



الشكل (15) يبين رسم شعاع الاهتزاز قبل وبعد وضع الوزن التجريبي

الخطوة الثالثة: نرسم موازي للشعاع الأزرق (الشعاع الفعال) وبالحساب الدقيق نجد طويلته

$v_c = 270\mu m$ والزاوية 330°



الشكل (16) يبين رسم الشعاع المؤثر.

الخطوة الرابعة: نرسم موازي للشعاع المؤثر ونحسب الزاوية بينه وبين امتداد الشعاع الأحمر لتحصل على زاوية θ التي يجب تحريك الوزن التجريبي بمقدارها.

حساب الوزن المصحح(correction weight)[7]

$$M_C = M_t \frac{V_0}{V_c} = 140 \times \frac{135}{270} = 50g$$

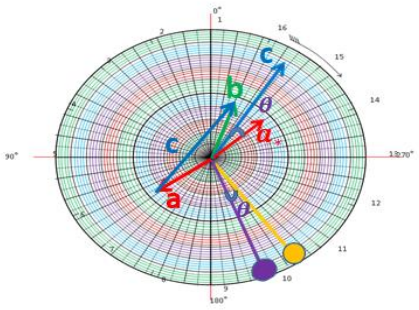
(أي وزن البرغي ضمن ثقب دائرة الموازنة)

حساب موضع كتلة الموازنة الحقيقية (الزاوية) من خلال العلاقة التالية:

$$\varphi_{c=}\varphi_t - \boldsymbol{\theta}$$

$$\varphi_c = 215^\circ - 15^\circ = 200^\circ$$

حيث يمكن ايجاد الزاوية$\boldsymbol{\theta}$ من الرسم وهي الزاويةالمحصورة بين الشعاعV_c ومعاكس الشعاعV_0 كما هو مبين في الشكل (16).

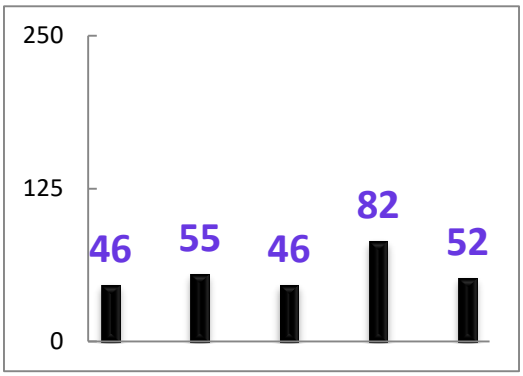


الشكل (17) يبين مكان توضع الثقل الحقيقي

وبالتالي يتم تغيير مكان الوزن التجريبي بتحريكه بزاوية 15° درجة بعكس عقارب الساعة ليصبح المكان الجديد للوزن وهو ما يسمى بالوزن التصحيحي عند الزاوية200° درجة.

نعيد اقلاع العنفة الغازية ونأخذ نتائج الاهتزازات على محاملها من جديد كما يلي:

قيم اهتزازات محامل العنفة الغازية بعد الموازنة



الشكل (18) يبين قيم الاهتزاز بعد عملية الموازنة

تلاحظ من خلال الشكلين(9–18) انخفاض قيم الاهتزاز على المحمل الرابع المهتز من القيمة

135 µm إلى القيمة 55. µm

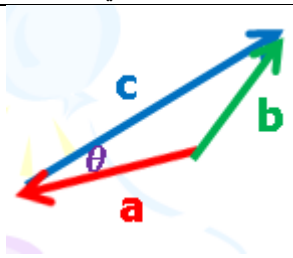
وهذه ما تسمى الطريقة التحليلية للموازنة وتأخذ وقت طويل في الحسابات لذلك استخدمنا الماتلاب بحيث يستطيع مهندس الصيانة أو الفني إجرء الموازنة بوقت أقصر وبدون إقلاع العتفة عدة مرات، وتم مقارنة النتائج بينهما كما يلي :

استخدام الماتلاب في برمجة المعادلات:

تم إيجاد الزاوية θ بطريقة الشعاع الفعال من خلال الرسم $\theta = 15°$ ولكن عند استخدام الماتلاب لابد من ايجاد معادلات رياضية والتي تسمى بعلاقة كاشي لحساب الزاوية θ :

تم حساب موضع كتلة الموازنة الحقيقية (الزاوية) من خلال العلاقة التالية: $\varphi_{c=}\varphi_{t-\theta=}$

ومن خلال علاقة كاشي في طرح الأشعة تجد:



$$\theta = cos^{-1}[\frac{va^2 + vc^2 - vb^2}{2\,.\,v_a\,.\,v_c}]$$

$$\theta = cos^{-1}[\frac{135^2 + 268^2 - 144^2}{2\,.\,135.268}]$$

$$\theta = 15^{\circ}$$

المعادلات الرياضية وترميزها باستخدام MATLAB

$M_t = 0{,}4\,\frac{M_{rotor}}{R_t}$ ⟵ Mt=0,4*Mrotor/rt ;

$\varphi_t = \varphi_0 + 90$ ⟵ phit=phi0+90 ;

⟵ $M_C = M_t\ \frac{V_a}{V_c}$

MC=round((Mt*v0/VC)/10)*10;

$\theta = cos^{-1}[\frac{va^2 + vc^2 - vb^2}{2\,.\,v_a\,.\,v_c}]$

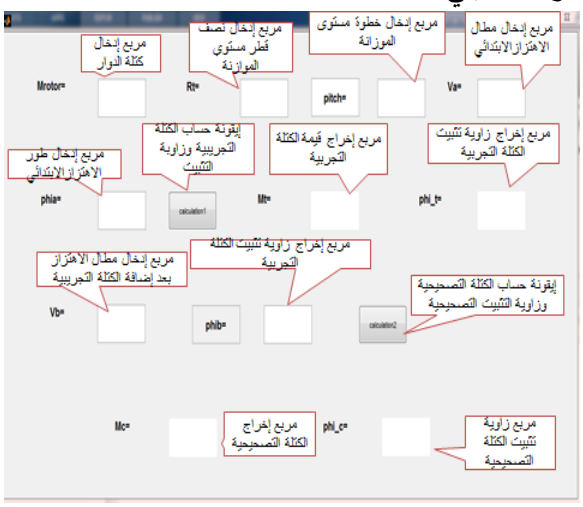
theta=round(acosd((v0*v0+VC*VC-v1*v1)/(2*v0*VC)));

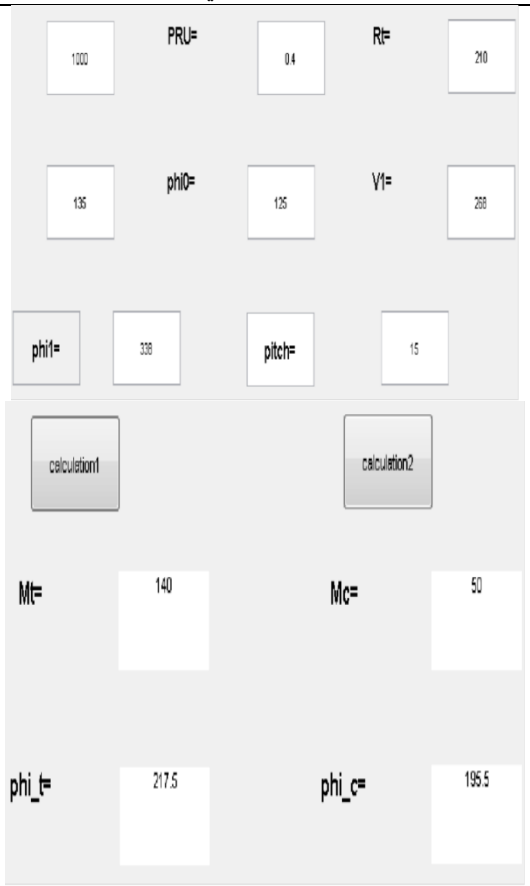
$\varphi_c = \varphi_t - \theta$ ⟵ PHIC=phit-theta

برنامج موازنة محاور العنفات الغازية باستخدام MATLAB

```
function cal2_Callback(hObject, eventdata, handles)
Mrotor=str2double(get(handles.mrotor,'string'));
pru=str2double(get(handles.pru,'string'));
rt=str2double(get(handles.rt,'string'));
v0=str2double(get(handles.v0,'string'));
phi0=str2double(get(handles.phi0,'string'));
Mt=0,4*Mrotor/rt;
Mt=10*round(Mt/10);
set(handles.mt,'string',Mt);
pitch=str2double(get(handles.pitch,'string'));
phit=phi0+90;
phit=phit-pitch/2;
phit=pitch*round(phit/pitch)+pitch/2;
set(handles.phit,'string',phit);
v1=str2double(get(handles.v1,'string'));
phi1=str2double(get(handles.phi1,'string'));
a=v0*[cosd(phi0) sind(phi0)];
b=v1*[cosd(phi1) sind(phi1)];
c=b-a;
VC=sqrt(c(1)*c(1)+c(2)*c(2));
f=atand(c(2)/c(1));
MC=round((Mt*v0/VC)/10)*10;
set(handles.mc,'string',MC);
theta=round(acosd((v0*v0+VC*VC-
v1*v1)/(2*v0*VC)));
PHIC=phit-theta;
set(handles.phic,'string',PHIC);
function cal1_Callback(hObject, eventdata, handles)
Mrotor=str2double(get(handles.mrotor,'string'));
pru=str2double(get(handles.pru,'string'));
rt=str2double(get(handles.rt,'string'));
v0=str2double(get(handles.v0,'string'));
phi0=str2double(get(handles.phi0,'string'));
pitch=str2double(get(handles.pitch,'string'));
Mt=0,4*Mrotor/rt;
Mt=10*round(Mt/10);
set(handles.mt,'string',Mt);
phit=((phi0+90));
phit=phit-pitch/2;
phit=pitch*round(phit/pitch)+pitch/2
set(handles.phit,'string',phit);
```

تصـــميم واجهة البرنامج بواســطة الماتلاب لإدخال المعلمات الأساسية والحصول على النتائج بسرعة من خلال الضغط على الأيقونة كما يلي:





المؤثرة في عمل العنفات الغازية. فالواقع العملي يشـير إلى أن الاهتزازات الناشئة عن عدم التوازن هي الأكثر تأثيراً على عمل العنفة وان حل المشـاكل الاهتزازية من خلال إجراء عملية التوازن ليس بالأمر السهل كما اتضح ذلك في القسم العملي.

للمسـاهمة في حل المشـاكل الاهتزازية يمكن اللجوء للنصـائح التالية:

يجب على المهندسـين العاملين أن يتمتعوا بالمعرفة والخبرة الواسعة في تصميم العنفات وتركيبها وظروف تشغيلها المختلفة مما يوفر الوقت والجهد في تحديد المسـار الصـحيح لمعالجة المشكلة.

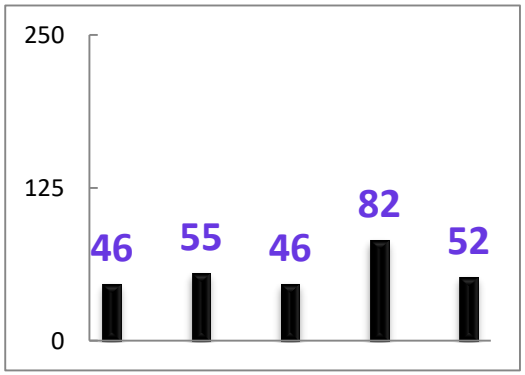
وجود كوادر صـيانة ميكانيكية لديهم مهارة عالية وخبرة في تحليل قيم الاهتزازات لمعرفة الخلل بشـكل صـحيح لتفادي الأعطال قبل حدوثها.

التشغيل الأمثل للعنفات الغازية ضمن شروط تشغيلية صحيحة.

مقارنة النتائج:

الطريقة التحليلية (الشـعاع الفعال)	برنامج الماتلاب
M_t=140g	M_t=140g
$\varphi_{t=}$215°	$\varphi_{t=,217,5°}$
$M_{C=50g}$	M_C=50g
$\varphi_{c=}$200°	$\varphi_{c=195,5°}$

قيم اهتزازات محامل العنفة الغازية بعد الموازنة



النتائج والتوصيات:

لحل المشـاكل الاهتزازية يجب معرفة الأسـباب الرئيسـة لنشـوء الاهتزازات والتي قد تكون تصميمية أو تركيبية أو استثمارية، إن الواقع العملي والظروف المحيطة بعمل هذه العنفات تثبت أن الاجهادات الكبيرة الميكانيكية والحرارية هي من أهم الأسـباب

التمويل: هذا البحث ممول من جامعة دمشـق وفق رقم التمويل (501100020595).

References:

[1]: Stan way R&JO Reilly, "State-variable free Back Control of Rotor –Bearing Suspension System" England,2004.

[2]: Krodkiewski J.M.,Sun L.&Cen Y,. "Control Low Synthesis for Self- Tuning Adaptive Control of Forced Vibration in Rotor System"vol. 1,PP:S9-25-37Lyon ,france,Oct.22-23-2008.

[3]: Krodkiewski J.M.,Sun L.&Cen Y,. "Improvement of Stability of Rotor System by Introduction a Hydraulic Damper into An Active Journal Bearing" International Journal of Rotating Machinery ,Vol.3No.1,PP:45-52-England 2010.

[4]:Zhou S.& Shi J., "Supervisory Adaptive Balancing of Rigid Rotor During Acceleration " Transactions of NAMRI/SME,VOL.27,PP:452-430,2012

[5] :Zho S.& Shi J., "Imbalance Estimation for Speed –Varying Rigid Rotor Using time-varying Observer" ASME Transactions Journal of Dynamic System, Measurements and Control,U.S.A,.2014.

[6]: Zho S.& Shi J., "Imbalance Estimation for Speed –Varying Rigid Rotors Using Time- Observer" ASME Transactions Journal of Dynamic System, Measurements and Control,vol.123,pp,637,2001.

[7]: Zhou S.,Shin K.,Dyer S.W.,Shi J.& Ni J.,"Extended Influence Coefficient Method for Rotor Active Balancing of Rigid Rotor During Acceleration "The Shock and Vibration Digest,Vol33, NO. MATE web of couf.1670 2015,2018.

[8] :Optimization Gas Turbine Balancing methods to Increase Availability and Reliability with case 701DMWcombined cycle power plant2020 international conference.

[9]: Analysis and Treatment of Abnormal vibration of Gas Turbine Generator January 2019 E3S Web of conference 118(9):02038.

[10]: Detection and Modeling vibrational Behavior of Gas Turbine Besed on Dynamic Neural Networks Approach vol 68(2018).NO3.143-166.

[11]: Vibration control of Rotor optimization of unbalanced force and unbalanced moment IEEE Access >volume 8.

[12]: Dynamic Analysis and Balancing of 100 MW Gas Turbine Generators Jun 2016At:Asheville.

[13]: ISO-International standard N 1940/1-Mechanical vibration – balance requirement of rigid rotors- parts 1- Determination of permissible residual unbalance (1986-09-01).

[14]: Machinery vibration/balancing victor wowk. Mc Grow-Hill,1995.