مجلة جامعة دمشق للعلوم الهندسية
المجلد41 العدد (3) – 2025: 240-254

Damascus University Journal for engineering sciences
Vo 41 number (3) -2025: 240-254

موازنة محاور العنفات الغازية في محطات الطاقة الكهربائية باستخدام طريقة الشعاع الفعال

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

[1]*. طالبة دراسات عليا (دكتوراه) في هندسة تصميم وبناء الآلات في قسم التصميم الميكانيكي بكلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية بجامعة دمشق. Myada4.alahmdd@damascuniversity.edu.sy

[2]. أستاذ مساعد، مهندس، دكتور في قسم هندسة التصميم الميكانيكي بكلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية بجامعة دمشق. EssamKarKot@Damascsuniversity.edu.sy

[3]. أستاذ، دكتور في قسم الميكانيك العام بكلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية بجامعة دمشق. WaadOmran@Damscusuniversity.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 مسببة 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.

يمكن تحسين أداء العنفة الغازية من خلال تقليل الاهتزازات على محاملها وخصوصاً الاهتزازات الناتجة عن عدم توازن الأجزاء الدوارة المكونة منها العنفة وذلك باستخدام تقنيات حديثة (طريقة الشعاع الفعال) لتحقيق العوامل الاقتصادية والتقنية العالية للآلات، والحفاظ على استمرارية الإنتاج، وإطالة العمر التشغيلي لها، بالإضافة الى تقديم مبادئ أساسية لعملية الموازنة الديناميكية للعنفات الغازية في الموقع من أجل زيادة الخبرات العملية في هذا المجال لحل هذه المشاكل.

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

تاريخ الايداع: 2023/3/5
تاريخ القبول: 2023/3/30

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

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

Balancing axes of gas turbine in electric power plant by using effective vector way

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

*[1.] Graduate Student (phD) in Machinery Design and Building Engineering in the Mechanical Design Engineering Department Faculty of Mechanical and Electrical Engineering Damascus University.
Myada4.alahmdd@damascuniversity.edu.sy

[2.] Assistant Professor in the Mechanical Design Engineering Department Faculty of Mechanical and Electrical Engineering Damascus University.
EssamKarKot@Damascsuniversity.edu.sy

[3.] Professor in General Mechanical Department Faculty of Mechanical and Electrical Engineering Damascus University.
WaadOmran@Damscusuniversity.edu.sy

Received: 5/3/2023
Accepted: 30/3/2023

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.

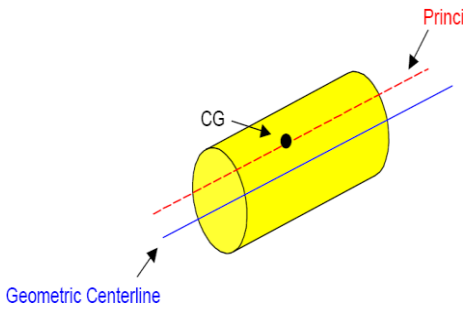
The performance of the gas turbine can be improved by reducing the vibrations on its bearings, especially the vibrations resulting from the imbalance of the rotating parts that make up the turbine, by using modern techniques (the effective beam method) to achieve the economic and high technical factors of the machines, maintain the continuity of production and extend their operational life. In addition to Presenting basic principles of the dynamic balancing process of gas turbines on site in order to increase practical experiences in this field to solve these problems.

Keywords: gas turbines - balance - vibration - effective factor.

المقدمة

تعتبر الموازنة الديناميكية واحدة من أهم أعمال الصيانة في المعامل الانتاجية 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 الالة. أما في الوقت الحاضر فهناك اهتمام كبير جداً ومتزايد في الموازنة الديناميكية يشمل طيف واسع في المعدات والأجزاء الدوارة وخاصة الموازنة الديناميكية للعنفات الغازية في محطات توليد الطاقة الكهربائية والغاية من ذلك هو ضمان تشغيل سليم خالٍ من العيوب والضوضاء.

تعريف اللاتزان: يمكن تعريف اللاتزان بانه تلك الحالة الموجودة في المحاور الدوارة المصاحبة لانتقال قوة الاهتزاز أو الحركة الاهتزازية الى المحامل نتيجة لوجود القوى المركزية centrifugal forces [1] وهناك تعريف أكثر شيوعاً وهو التوزيع غير المتساوي للكتلة حول محور الدوران. أو بصورة عامة فإن اللاتزان هو حالة عدم انطباق خط المركز الهندسي مع خط المركز الحقيقي للجسم، ففي الشكل التالي يمثل خط المركز الهندسي geometric centerline المركز النظري لمساحة مقطع المحور وهو لا ينطبق مع خط المركز الحقيقي الذي يمر بمركز الثقل والذي يسمى أيضاً بالمحور الرئيسي للكتلة Principal Interia Axis



الشكل (1) يبين عدم انطباق خط المركز الهندسي مع خط المركز الحقيقي للجسم

إن الاختلاف بين المركزين قد يكون سببه عدم تجانس مادة المحور shaft material أو التشوهات والعيوب التصنيعية، وقد يكون السبب هو التغيرات الحاصلة نتيجة الظروف والعوامل التشغيلية. وأياً كان السبب فإن هذا الاختلاف يسبب ظهور قوى مركزية. ويمكن التغلب على هذه المشكلة وإعادة التوازن بعملية تدعى الموازنة Balancing التي هي عبارة عن عملية إعادة توزيع الكتلة بحيث ينطبق أو يقترب المركز الهندسي من المركز الحقيقي للجسم الدوار.

أسباب عدم الاتزان:

1- عيوب التصنيع Manufacturing Faults: وتشمل عدم تجانس الفجوات والمسامات، مسارات السباكة، التشغيل (الخراطة أو التفريز) اللامتمركز أو التجميع غير المتناظر. كذلك تشمل الاخطاء التصميمة التي لا يمكن تجنبها أحياناً.

2-عيوب التجميع Assembly faults: وهي العيوب الناجمة عن عدم التناظر أو التجانس أثناء تجميع الاجزاء المختلفة، فمثلاً عندما يتم تجميع جزء دوار Rotor مع المحور الحامل له، يحصل أحياناً عدم تماثل في توزيع الفراغات مما يؤدي إلى زيادة الكتلة في جانب اكثر من الجانب او الجوانب الأخرى، كذلك فإن وجود الإقفال Keys غير النظامية يؤدي الى زيادة عدم الاتزان في أغلب الاحيان.

3-أسباب تشغيلية: وتشمل التشوهات الحاصلة بسبب الظروف التشغيلية لفترات من الزمن مثل التآكل بل بأشكاله المختلفة والترسبات المتراكمة، كذلك التشوهات الحاصلة بسبب القوى الميكانيكية والاجهادات التي يتعرض لها المحور كالانحناء او فقدان بعض الاجزاء مثل الريش والزعانف في المراوح والمضخات والتوربينات.

وعلى الرغم من إمكانية معالجة أغلب هذه المشاكل (إن لم يكن جميعها) بواسطة عملية الموازنة، ولكن ينبغي الانتباه الى ان الموازنة ليست بديلاً أو علاجاً شافياً لبعض مشاكل اللاتزان مثل العيوب التصنيعية الكبيرة والتي يجب تلافيها مسبقاً من

خلال عملية التصنيع الصحيحة والاعتناء بتطبيق المعايير المتبعة عالمياً.

فوائد الموازنة:

لعملية الموازنة الكثير من الفوائد أو النتائج الجيدة، نذكر منها ما يلي:

1- تقليل الاهتزازات والضوضاء: حيث ان عدم الاتزان هو السبب الرئيسي في أغلب مشاكل الاهتزازات والضوضاء العالية في المعدات الصناعية، وبإزالة أو تحجيم عدم الاتزان فإن الاهتزاز والضوضاء ينخفضان الى مستويات متدنية.

2- تقليل الاجهادات: فالقوى العالية الناجمة من عدم الاتزان تسبب اجهادات عالية في هياكل المعدات مثل المحامل والمساند وغيرهما.

3- زيادة عمر المعدَة التشغيلي: كلما كان التشغيل سليماً كلما كان العمر التشغيلي أطول وفترات التوقف اقل.

4- تحسين جودة المنتج: حيث ان انخفاض مستوى الاهتزاز يؤدي الى تحسين الانتاج وخصوصاً في آلات مكائن القطع.

5- زيادة الامان بالنسبة للمشغلين Personnel Safety: بسبب تقليل احتمالية الفشل او الكسر، وكذلك تقليل الضوضاء المزعجة للمشغلين.

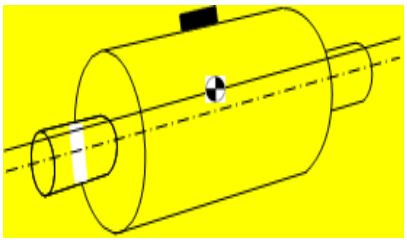
6- تقليل كلف الصيانة وزيادة الكفاءة: فالمعدَة المتوازنة لا تسبب تآكل او تلف الأجزاء الميكانيكية مثل المحامل والتروس وغيرها. كذلك فإن عدم تبدد القدرة في الاهتزازات يعني الاستغلال الافضل لها وزيادة الكفاءة.

أنواع اللاتزان:

كما مر سابقاً فإن اللاتزان هو حالة عدم تطابق الخط المركزي الهندسي للجسم مع الخط المركزي الحقيقي أو المحور الرئيسي للكتلة Principal Inertia Axis. وبسبب وجود احتمالات متعددة بعدم الانطباق، فإن انواع اللاتزان [2] تقسم تبعاً لذلك الى الاقسام التالية:

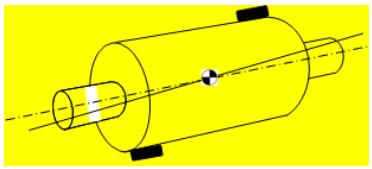
1- اللاتزان السكوني Static Unbalance وهو اللاتزان المتولد نتيجة وجود إزاحة نسبية بين محور الدوران (المحور الهندسي) والمحور الرئيسي للكتلة بحيث يكون المحوران متوازيين. ويسمى احياناً هذا النوع بعدم اتزان القوى Force Unbalance.

ويمكن التغلب عليه بإجراء موازنة احادية المستوى (في مستوى واحد) والتي تتطلب إضافة كتلة واحدة في زاوية محددة.



الشكل (2) يبين الموازنة في مستوي واحد

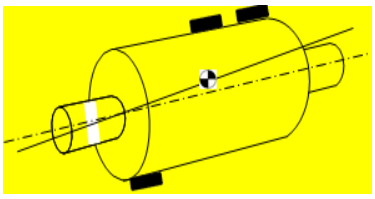
2- اللاتزان المزدوج Couple Unbalance ويتولد هذا النوع نتيجة وجود كتلتين متساويتين في المقدار في مستويين مختلفين وبزاويتين الفرق بينما 180 درجة، حيث يصنع المحور الرئيسي Principal inertia Axis زاوية مع المحور الهندسي ولكنهما يتقاطعان في نقطة ما. ويمكن التغلب على هذا النوع من اللاتزان بإضافة (أو إزالة) كتلتين في مستويين مختلفين وبفرق طور مقداره 180 درجة.



الشكل (3) يبين اللاتزان المزدوج

3- اللاتزان الديناميكي Dynamic Unbalance وهو عبارة عن مجموع تأثير النوعين السابقين وينتج عندما يكون المحور الرئيسي مزاحاً بمقدار معين وكذلك مائلاً بزاوية نسبة الى المحور الهندسي. أي ان هناك تأثير لمزدوج مع قوة. وهذه

الحالة من اللاتزان هي الأكثر شيوعاً في الواقع العملي، حيث يندر وجود تأثير مزدوج لوحده أو قوة لوحدها. وللتغلب على هذا النوع من اللاتزان يجب اضافة (أو إزالة) كتلتين في مستويين مختلفين وبزاويتين مختلفتين.



الشكل (4) يبين الاتزان الديناميكي

من الدراسات المرجعية للمحاور في عام 2020 قام الباحثون الإندونيسيون N.A. setiawan –Mohammad Said- Ahmad-AL Dailor بدراسة تحسين طرق موازنة العنفات الغازية ذات الطراز 701DMW لزيادة الانتاجية في محطات الطاقة المركبة حيث تم حل مشكلة الاهتزاز العالي نتيجة عدم التوازن في مدينة كريسيك اندونيسيا باستخدام طريقة الموازنة بمستويين حيث وجدوا أن هذه الطريقة تأخذ وقت طويل 35:75 ساعة وأربع مراحل لإقلاع العنفة وهذه المدة طويلة تسبب خسائر في انتاج الطاقة وبالتالي تم تحسينها باختصار عملية الموازنة من أربع مراحل الى مرحلتين ومنه تم تخفيض الوقت من 35:75 إلى23:50 ساعة وزاد الانتاج بمعدل 0,4% عن الطرائق السابقة.

شرح طريقة الموازنة بالشعاع الفعال:

يمكن استخدام هذه الطريقة لحساب الوزن الذي يجعل المحور متوازناً[3] حيث تحدد هذه الطريقة:

. مكان عدم التوازن

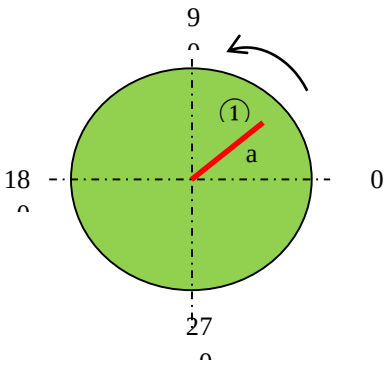
. مقدار عدم التوازن

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

الخطوة(1) نشغل بسرعة دوران اختيارية.

أولا: يتم التأكد من أن الاهتزاز أصبح مستقراً ثم تؤخذ بيانات الاهتزاز وتدون السعة والطور حيث لا يمكن البدء بالموازنة إذا لم يصبح الاهتزاز مستقراً.

مثلا: تؤخذ نتائج قياسات الاهتزاز التجريبية للتشغيل الطور 45 والسعة a m µ نرسم شعاع الاهتزاز(a) كما هو موضح في الشكل (5)



الشكل (5) يوضح الشعاع a

الخطوة(2) تحديد قيمة الوزن التجريبي ومكانه اعتماداً على البيانات التالية:

حساب مقدار الكتلة المصححة التجريبية (ثقل تجريبي) [3]:

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

حيث:

W: وزن تجريبي (Kg)

G: وزن المحور (Kg)

A: نصف قطر السطح المصحح (mm)

r: السعة

$\frac{1}{4}$ معامل التأثير

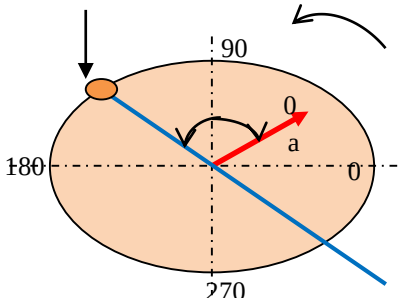
من الضروري ربط ثقل تجريبي بحيث تكون قيمته كافية للحصول على نتائج مقنعة، ويجب أن لا نجعل المحور يولد اهتزازاً زائداً عند السرعة الحرجة.

مكان وضع الثقل التجريبي:

يمكننا وضع الثقل في أي موضع ولكن من المستحسن وضع الثقل في مكان بحيث تنخفض السعة الى 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 (6) يوضح مكان الوزن التجريبي

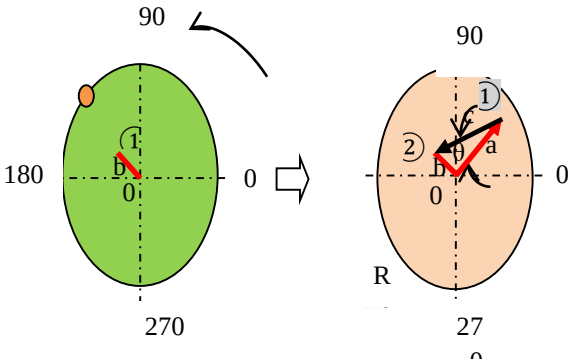
الخطوة(3): يوضع الثقل على مستوي الموازنة المبين في الشكل ويدار المحور بأي سرعة دوران اختيارية.

تؤخذ بيانات الاهتزاز(تغيرات السعة والطور) ويرسم مخطط شعاعي وبالاعتماد على هذا المخطط نوجد شعاعات الاهتزاز قبل وبعد وضع الوزن ونحسب الشعاع المؤثر.

نتائج القياسات بعد وضع الوزن التجريبي مثلا:

- الطور 165°
- السعة b µm
- شعاع الاهتزاز

نصل بين النقاط 1،2 والنقطة المركزية، 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 (7)

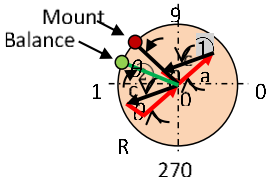


الشكل(7) يوضح الشعاع الفعال

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

حساب مقدار الثقل الموازن[4] (الكتلة المصححة)

- مقدار الثقل الموازن = $\frac{a}{c}$ X مقدار الثقل التجريبي.
- a شعاع الاهتزاز(µm)الناتج عن التشغيل للمرة الأولى.
- C طول الشعاع الفعال (µm)
- زاوية التصحيح θ: يمكن نقل الشعاع الفعال بالتوازي من المركز (o) إلى (c) لجعل الشعاع (c) كقوة معاكسة لشعاع الاهتزاز a لتتم الموازنة يجب ازاحة الشعاع الفعال بالزاوية θ أي تحريك الوزن بالزاوية θ كما هو مبين في الشكل (8).



الشكل(8) يبين مقدار الزاوية θ و مكان الثقل الحقيقي

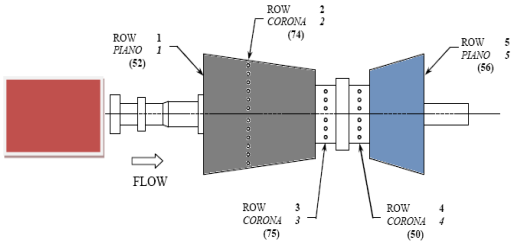
وهذه الزاوية تغير زاوية الشعاع الفعال عند ربط الثقل التجريبي (ولكل جسم دائر زاوية مختلفة).

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 حده المسموح به، مما يؤدي الى خروج العنفة عن الخدمة نتيجة عدم توازن المحور، وهو من الأعطال الأكثر تعقيداً نتيجة قلة الخبرة في موازنة المحور ضمن الموقع، بالإضافة الى عدم توفر الأجهزة والبرامج الحديثة اللازمة للموازنة لحل هذه المشكلة.

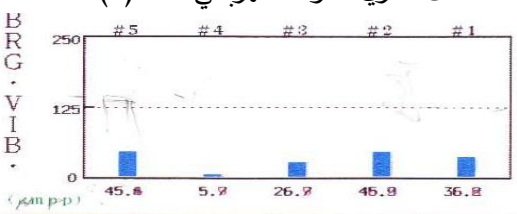
– تم أخذ محور المولدة للعنفة الغازية الأولى ذات الطراز 701D كعينة لدراسة البحث كونها كانت تعاني من مشاكل اهتزازية أثناء عملية التشغيل. ونتيجة عدم القدرة على حل هذه المشاكل عند سرعة 3000 rpm تم استبدال المحور من قبل فريق الصيانة، وعند التركيب والاقلاع ظهرت مشاكل اهتزاز على المحمل الرابع نتيجة عدم التوازن.



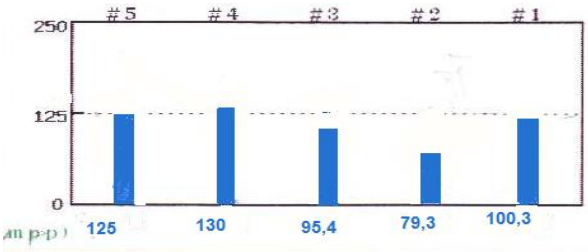
الشكل (9) يبين محور العنفة المدروسة.

تمتلك 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 (10) يبين قيم الاهتزاز الطبيعية على محامل المحور



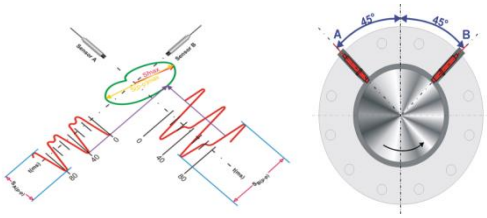
الشكل (11) يبين ارتفاع قيم الاهتزاز على المحمل الرابع

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

الشكل (12) يبين المحمل المهتز ومستوي الموازنة القريب منه

الشكل(13) يبين مستوى الموازنة ومكان توضع كتل الموازنة

توضع الحساسات على المحامل:

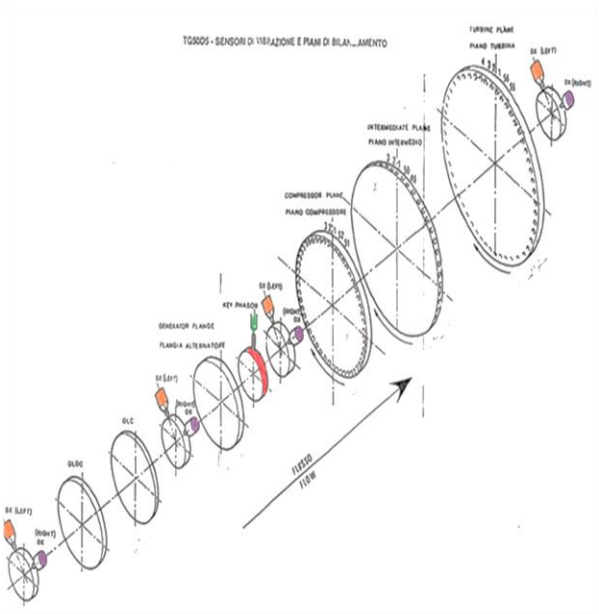


هناك نوعين من الحساسات:

حساسات الاهتزاز النسبي: والتي تحدد انتقال 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.



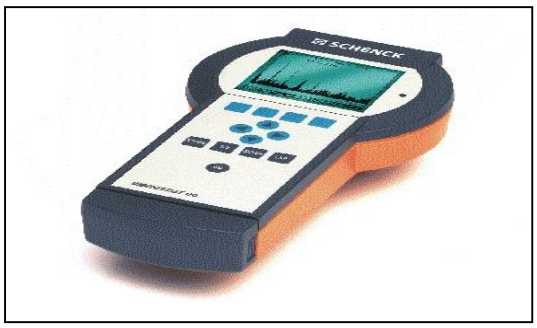
الشكل (14) يبين مستويات الموازنة لمحور العنفة الغازية

أنصاف أقطار مستويات الموازنة على المحور المدروس:

الجدول(1) يبين أنصاف أقطار مستويات الموازنة

	RC	EE	PM	CE
نصف قطر مستوي الموازنة	840#	420#	450#	380#
weight حجم البرغي size	M10	M8	M6	M12
thread عمق البرغي depth	25	30	12	40
عمق الحفر drill depth	35	-	18	-

تم استخدام جهاز اهتزاز لقياس وتحليل الاهتزاز العالي وهو جهاز vibrotest 60 حيث تم قياس موجة الاهتزاز كما في الشكل وهذا يدل على وجود عدم توازن في المحور.



الشكل (15) يبين شكل جهاز vibrotest 60

حساب الوزن التجريبي: [5]

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

RMM: كتلة الموازنة الأعظمية للمحور.

URP: هي كتلة الموازنة المتبقية لكل 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 سرعة دورانها 3000 rpm

نقاطع سرعة الدوران مع المنحني G تحصل على قيمة 0.4

URP=gmm/kg

حيث وزن المحور M_{rotor} =10000 kg

ونصف قطر دائرة الموازنة 420 mm

نطبق القانون:

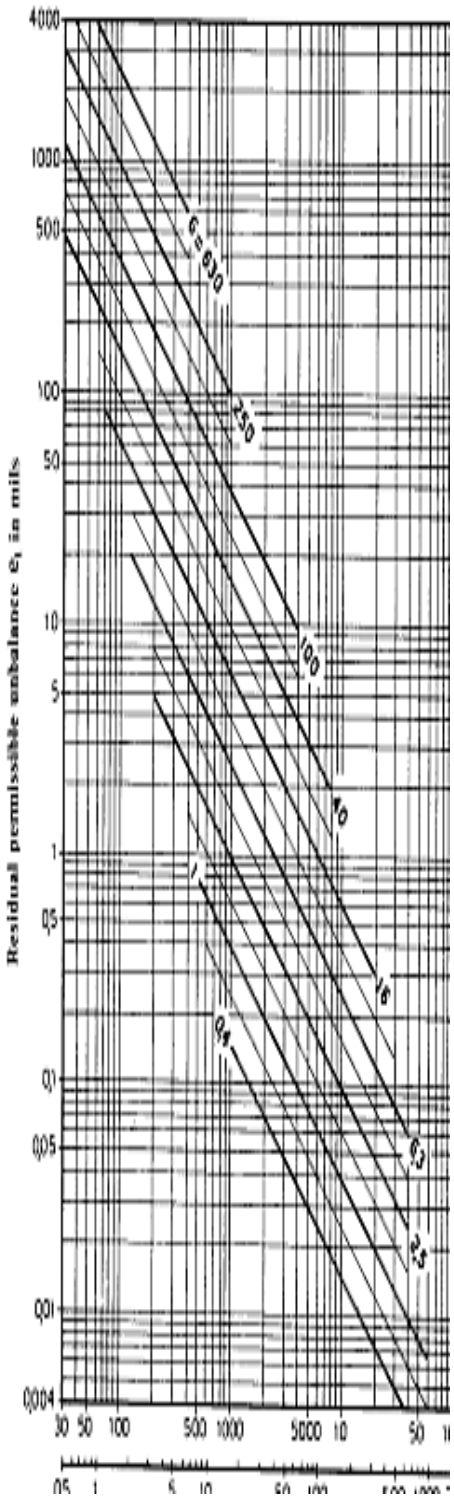
$$MMR = \frac{0.4\times10000}{420}=9.5\ g$$

لكن الوزن للتجريبي يعطى بالعلاقة:

$$Mt=10\times MMR = 95g\sim100g$$

الجدول(2) يبين قيمة درجة عدم التوازن للآلات الدوارة

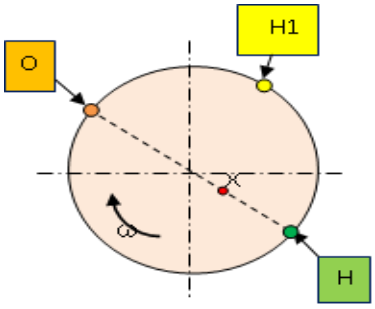
نوع الآلة " المحور "	اللاتوازن المكافئ	درجة نوعية الموازنة G Grade mm/sec.
الجيروسكوبات، المغازل، الأقراص ودوار المولد " المتحرض " لمسننات بالغ الدقة.	0.4	G = 0.4
المتحرضات الكهربائية الصغيرة مع متطلبات الموازنة بمستوى عالي. آلات التسجيل على شريط مغناطيسي والفونوغراف (الحاكي الفونوغراف) الذي يقود خط الإسقاط لفيلم سينمائي وقيادة آلات الطحن العالية الدقة. المحاور الدوارة للعنفات والضواغط للمحركات النفاثة عالية السرعة. المحاور الدوارة للعنفات البخارية	1.0	G = 1.0
مع متطلبات الموازنة بمستوى عالي.		
المحاور الدوارة للعنفات الغازية والبخارية، والمولدات الكهربائية العنفية، والمنفاخ التوربيني و المضخات العنفية. عنفات الرئيسية للسفن التجارية. الشواحن، وضواغط الرشف من أجل السفن الهوائية. متحرض المحرك، دوارات المولدات الكهربائية الصغيرة مع متطلبات الموازنة بمستوى معقول معتدل، ومن أجل أداة كهربائية داخلية بجودة عالية ومثاقب طبيب الأسنان، أسطوانات الترذيذ.	2.5	G = 2.5



الشكل(16) يبين مخطط المقياس العالمي لموازنة المحاور

نستخدم طريقة الشعاع الفعال كما يلي: [6]

- ما هي النقطة العليا: عندما يدور المحور وهو في حالة عدم توازن، فان النقاط الموجودة في حالة عدم توازن تنحرف عن حالة توازنها. والنقطة التي يكون عندها الانحراف أعظميا تعرف بالنقطة العليا.

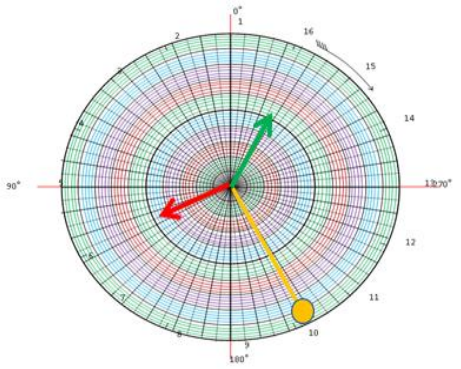


الشكل (17) يبين النقطة العليا للاهتزاز

- الخطوة الأولى: نرسم شعاع الاهتزاز العالي (الشعاع الأحمر) الذي قيمته 135 µm بزاوية الطور126.
- ونضع الوزن التجريبي متقدم بزاوية 90 درجة أي على الزاوية 210.

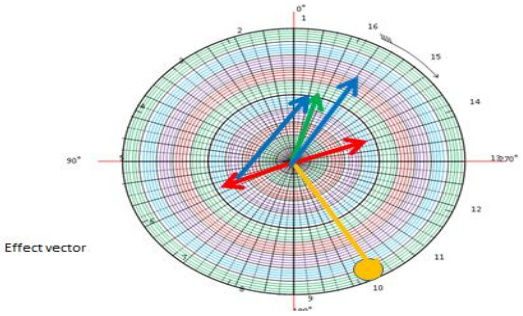
لأن السرعة الحرجة للمحور المدروس هي 1500 rpm وبالتالي حسب قوانين هذه الطريقة نضع الوزن التجريبي متقدم بزاوية 90 درجة.

- نحصل على شعاع آخر للاهتزاز (الشعاع الأخضر) الذي قيمته 144µm عند زاوية الطور338.
- الخطوة الثانية: تصل بين الشعاعين تحصل على الشعاع الفعال الشعاع الأزرق effect factor
- نرسم موازي للشعاع الأزرق (الشعاع الفعال) وبالحساب الدقيق نجد قيمته 230 µm وزاوية الطور 330 درجة.



الشكل (18) يبين رسم شعاع الاهتزاز قبل وبعد وضع الوزن التجريبي

الخطوة الثالثة: نرسم شعاع من نهاية الشعاع الأحمر الى بداية الشعاع الأخضر فنحصل على الشعاع الأزرق وهو ما يسمى بالشعاع الفعال أو المؤثر الذي قيمته 230 µm وزاويته 330°



الشكل (19) يبين رسم الشعاع المؤثر

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

حساب الوزن الحقيقي (correction weight)[7]

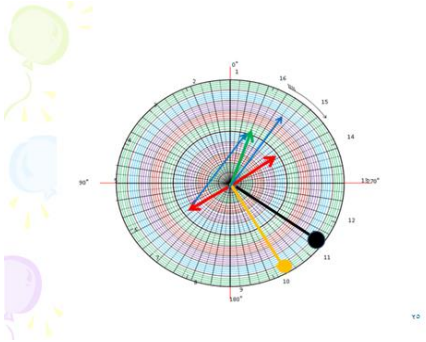
$$M_C = M_t \quad \frac{V_0}{V_t} = \quad 100 \times \frac{135}{230} = 58g \approx 50g$$

نقرب الوزن للقيمة$50g$ حسب الأوزان التجريبية (أي وزن البرغي ضمن ثقب دائرة الموازنة)

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

$$\varphi_{c=}\varphi_{0+180-}\varphi_t$$

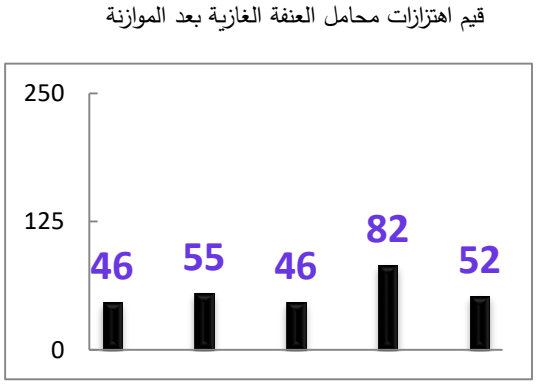
$$\varphi_c = 126 + 180 - 330 = -29 \approx -30$$



الشكل (20) يبين مكان توضع الثقل الحقيقي

وبالتالي يتم تغيير مكان الوزن التجريبي بتحريكه بزاوية 30 درجة بعكس عقارب الساعة ليصبح المكان الجديد للوزن وهو ما يسمى بالوزن الحقيقي عند الزاوية 230 درجة.

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



الشكل (21) يبين قيم الاهتزاز بعد عملية الموازنة

تلاحظ من خلال المخطط البياني انخفاض قيم الاهتزاز على المحمل الرابع المهتز من القيمة

130 µm إلى القيمة 55 µm

النتائج والتوصيات:

لحل المشاكل الاهتزازية يجب معرفة الأسباب الرئيسة لنشوء 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 الأسباب المؤثرة في عمل العنفات الغازية. فالواقع العملي يشير إلى أن الاهتزازات الناشئة عن عدم التوازن هي الأكثر تأثيراً على عمل العنفة وان حل المشاكل الاهتزازية من خلال اجراء عملية التوازن ليس بالأمر السهل كما اتضح ذلك في القسم العملي.
للمساهمة في حل المشاكل الاهتزازية يمكن اللجوء للنصائح التالية:

- يجب على المهندسين العاملين أن يتمتعوا بالمعرفة والخبرة الواسعة في تصميم العنفات وتركيبها وظروف تشغيلها المختلفة مما يوفر الوقت والجهد في تحديد المسار الصحيح لمعالجة المشكلة.
- وجود كوادر صيانة ميكانيكية لديهم مهارة وخبرة في تحليل قيم الاهتزازات لمعرفة الخلل بشكل صحيح لتفادي الأعطال قبل حدوثها.
- التشغيل الأمثل للعنفات الغازية ضمن شروط تشغيلية صحيحة.
- **التمويل:** هذا البحث ممول من جامعة دمشق وفق رقم التمويل(501100020595).

-References

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

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

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

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

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

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

[7]: Machinery vibration /balancing victor to wowk.