

السرعة الحرجة لعمود نقل الحركة وأثر الاهتزازات في آلية نقل القدرة إلى مضخة تزويد الطائرات بالوقود

سليمان حاتم سليمان*¹ عصام قرقوط² راكان الحاج عبد³

*1. طالب دراسات عليا (دكتوراه) في هندسة تصميم وبناء الآلات في قسم هندسة التصميم الميكانيكي بكلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية بجامعة دمشق.

Solimanhateem1979@Damascusuniversity.edu.sy

2. أستاذ مساعد، دكتور في قسم هندسة التصميم الميكانيكي بكلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية بجامعة دمشق.

EssamKarkot@Damascusuniversity.edu.sy

3. دكتور، مدرس في قسم هندسة التصميم الميكانيكي بكلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية بجامعة دمشق.

RakanAlhajAbd@Damascusuniversity.edu.sy

الملخص:

يتناول هذا البحث دراسة السرعة الحرجة لعمود نقل الحركة في آلية نقل القدرة إلى مضخة تزويد الطائرات بالوقود وأثر الاهتزازات عليها. تم قياس بارامترات الاهتزاز في النموذج الأساسي لهذه الآلية، وحساب قيم السرعة الحرجة لعمود نقل الحركة إلى المضخة عند عدد دورات العمل نفسها. كما تم إجراء تعديل تصميمي على آلية نقل القدرة إلى المضخة أدى إلى تقليل طول عمود نقل الحركة بمعدل (33%) وزيادة قطره بمقدار (2mm) عما هو عليه في النموذج الأساسي. أظهرت نتائج الدراسة أن قيم السرعة الحرجة لعمود نقل الحركة في النموذج المعدل قد ازدادت، وأن سرعة وتسارع الاهتزاز قد انخفضت عند عدد الدورات نفسها مقارنة بالنموذج الأساسي لهذه الآلية، وحصلنا بالنتيجة على عوامل أمان أكبر واستقرارية أكثر في الأداء أثناء الاستثمار، إضافة لإطالة عمر خدمة منظومة تزويد الطائرات بالوقود في مجال الطيران.

الكلمات المفتاحية: السرعة الحرجة، آلية نقل القدرة، مضخة تزويد الطائرات بالوقود، عمود نقل الحركة، بارامترات الاهتزاز.

تاريخ الإيداع: 2023/1/24

تاريخ القبول: 2023/3/22



حقوق النشر: جامعة دمشق - سورية،

يحتفظ المؤلفون بحقوق النشر بموجب CC

BY-NC-SA

The critical speed of the transmission shaft and effect of vibrations of power transmission mechanism to aircraft refueling pump

Souliman Hatem Souliman*¹ Essam Karkot² Rakan Alhaj Abd³

*¹. Graduate Student (PhD) in Machinery Design and Building Engineering in the Mechanical Design Engineering Department, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Damascus University.

Solimanhateem1979@Damascusuniversity.edu.sy

². Assistant Professor, Dr in the Mechanical Design Engineering Department, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Damascus University.

EssamKarkot@Damascusuniversity.edu.sy

³. Lecturer in the Department of Mechanical Design Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Damascus University

RakanAlhajAbd@Damascusuniversity.edu.sy

Abstract:

This research deals the study of the critical speed of the transmission shaft of power transmission mechanism to aircraft fuel pump and the impact of vibrations on it. The vibration parameters were measured in the basic model of this mechanism, and the critical speed values of the transmission shaft to the pump were calculated at the same number of working cycles. A design modification was also made to the power transmission mechanism to the pump, which reduced the length of the transmission shaft by (33%) and increased its diameter by (2mm) compared to the original model. The results of the study showed that the values of the critical speed of the transmission shaft in the modified model increased, and that the speed and acceleration of vibration decreased at the same number of cycles compared to the basic model of this mechanism, and as a result we obtained greater safety factors and more stability in performance during investment, in addition to extending the service life Aircraft refueling system in aviation.

Key words: Critical speed, Power transmission mechanism, Aircraft fuel pump, Transmission shaft, Vibration parameters.

Received:24/1/2023

Accepted: 22/3/2023



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

المقدمة:

إن السبب الرئيسي لوجود عمود نقل الحركة (propellershaft)، أو عمود الكردان (Cardanshaft) في آليات نقل القدرة هو ضرورة توصيل أجزاء مجموعة نقل الحركة drivetrain التي لا يمكن اتصالها مباشرة بسبب البعد أو الحاجة إلى توفير حركة نسبية بينها بما يضمن نقل العزم (rotation torque) بمستويات مختلفة، كنقل العزم من علبة السرعة إلى الأجزاء الأخرى في آلية نقل القدرة، كما يمكن لهذه الأعمدة أن تنقل الحركة من علبة السرعة إلى تجهيزات إضافية أخرى كالمضخة.

- إن زيادة معدل الاهتزازات في أجهزة نقل القدرة، يعتبر مؤشراً أساسياً لوجود الخلوصات وعدم التوازن أثناء الدوران، ويتعلق بعدد دورات الأجزاء الدوارة التي تعمل بسرعات تكون أقل أو قريبة من السرعات الحرجة (Gusarov, 1990, 152). غالباً ما تكون نتائج تحديد مؤشرات عدم التوازن غير متوافقة مع البيانات التجريبية والأخطاء الطفيفة في قياسات الاهتزاز لأجزاء آلية نقل القدرة (Nikiforov, 2013, 20).

- يعد عدم توازن عمود نقل الحركة الذي ينفذ حركة دورانية معقدة نتيجة وجود قوى بالاتجاهين المحوري والعمودي أحد الأسباب الرئيسية لظهور الاهتزازات، التي تؤثر على تنبئته وينتقل الاهتزاز تدريجياً إلى الأجزاء المتصلة به (Lyakhov, 2017, 135).

- يتم استخدام تقنية قياس وتحليل الاهتزازات في أجزاء آلية نقل القدرة كأحد طرق حساب مؤشرات وضع الطنين وتحديد مواضع الخطأ (Grigorev, 2018, 464, Albert, 2012, 248).

- عند انحناء عمود نقل الحركة تكون شدة (مطال) الاهتزازات بالاتجاه المحوري أعلى من نظيرتها بالاتجاه العمودي ويمكن تمييز حالتين:

(أ) مطال الاهتزاز يظهر بأعلى قيمة له عند تردد يقابل توافقية على مثل واحد (1X) r.p.m) عندما يكون الانحناء قريب من مركز عمود نقل الحركة.

(ب) مطال الاهتزاز يظهر بأعلى قيمة له عند تردد يقابل (2X) r.p.m) عندما يكون الانحناء قريب من طرفي عمود نقل الحركة (Arnold, 1979, 432).

- إن السرعة التي تتوافق مع الزيادة الحادة الموافقة لاتساع الاهتزازات التي يثيرها عدم توازن عمود نقل الحركة تدعى بالسرعة الحرجة (Critical speed) وهي في علم ميكانيكا المواد الصلبة السرعة الدورانية (angular velocity) النظرية التي تعمل على إثارة التردد الطبيعي (natural frequency) للأجزاء الدوارة كالأعمدة (shafts) أو المسننات (gears) (Seoud et al., 2012, 667) وتعتبر السرعة الحرجة مؤشراً مهماً يميز سلوك عمود الدوران في ظل ظروف التشغيل تحت أحمال مختلفة و يدل على مدى استقرار النظام، وعادة ما يتم تفسير هذه الظاهرة على أنها زيادة الطنين في سعة الاهتزاز عند تردد عمل القوى الناجمة عن عدم توازن عمود نقل الحركة الذي يتزامن مع سرعة الاهتزازات المسببة لانحنائه (Pasynkova, 2014, 238).

- لتحليل التأثيرات التي قد تظهر عند دوران عمود نقل الحركة، يجب أن نفكر في حالتين:

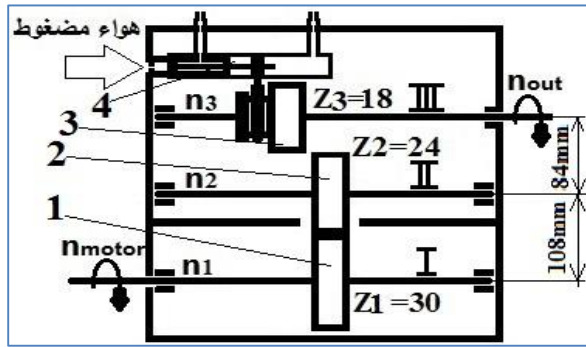
(أ) حالة مثالية: وهي دوران عمود نقل الحركة المتوازن.

(ب) حالة دوران عمود نقل الحركة غير المتوازن.

- إن عدم اتزان عمود نقل الحركة سوف يؤدي إلى حدوث انحناء فيه والذي بدوره يؤدي إلى تشكل اهتزازات رنانة (resonant vibration) عند سرعة معينة تكون كافية لإحداث أضرار بالآلية نقل القدرة، ومع زيادة سرعة الدوران ووصولها إلى التردد الطبيعي للآلية، يؤدي إلى زيادة اهتزازها بشكل كبير (Mure, 2005) (Alugongo, 2018, 978). ويظهر الشكل (1)

وفيه: 1- محرك. 2- علبة سرعة رئيسية. 3- وحدة نقل القدرة PTO. 4- عمود نقل الحركة بطول (90cm) وقطره (50mm). 5- مضخة تزويد الطائرات بالوقود.

ويظهر الشكل (3) مبدأ عمل وحدة نقل القدرة باستخدام الهواء المضغوط الذي يؤثر على المكبس (4) الذي يحرك المسنن (Z_3) ليتعشق مع المسنن (Z_2) الذي يدور مع المسنن (Z_1)، ويؤمن عملية وصل وفصل مسنن نقل الحركة إلى عمود الكردان الذي بدوره يدير عمود المضخة.



الشكل (3) المخطط الكينماتيكي لوحدة نقل القدرة PTO

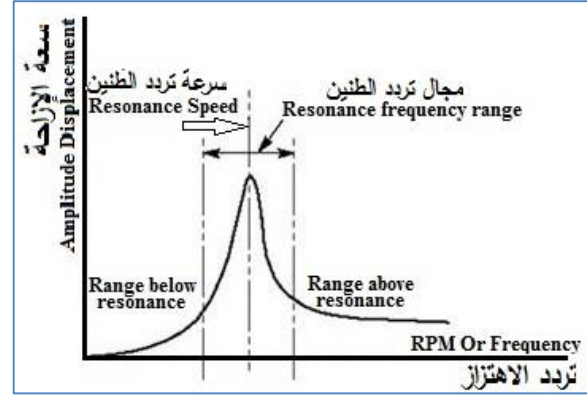
في النموذج الأساسي لآلية نقل القدرة إلى المضخة

2- الدراسة التجريبية (Expirical Studying):

1-2- قياس الاهتزازات في النموذج الأساسي لآلية نقل القدرة إلى مضخة تزويد الطائرات بالوقود:

□ تم استخدام جهاز Adash4900Vibrio التشيكي الصنع لقياس وتحليل الاهتزاز لأجزاء آلية نقل القدرة في النموذج الأساسي، حيث يوصل بالحاسوب ويستخدم برنامج DDS2021 الذي يعمل على نظام (Windows). يظهر الجهاز المستخدم لقياس بارامترات الاهتزاز في الشكل (4).

السرعة الحرجة لعمود نقل الحركة الموافقة لسرعة تردد الطنين (Ellfi et al.,2001).

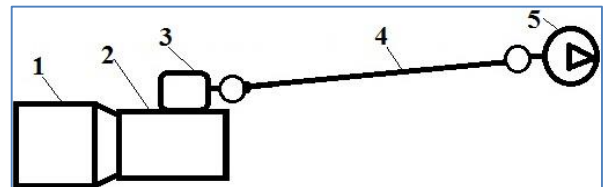


الشكل (1) منحنى السرعة الحرجة لعمود نقل الحركة

في مرحلة الاهتزاز بالنسبة لتردد الطنين

1- توصيف عمل النموذج الأساسي لآلية نقل القدرة إلى مضخة تزويد الطائرات بالوقود:

- تبين بالدراسة الميدانية للنموذج الأساسي لآلية نقل القدرة إلى مضخة تزويد الطائرات بالوقود أن وجود اهتزازات متزايدة في عمود نقل الحركة، بسبب التقادم و حدوث تآكل في الأجزاء الداخلية لوحدة نقل القدرة PTO (PowerTakeOff) من جهة، ومحور ومحامل المضخة من جهة أخرى إضافة لطول عمود نقل الحركة و عدم اتزانه أثناء الدوران مع الزمن، يشكل صعوبة في عملية وصل وفصل مسننات وحدة نقل القدرة، وأن مجموعة نقل الحركة أصبحت لا تؤمن الانتقال الانسيابي التدريجي للعزم الدوراني إلى المضخة. يتضح في الشكل (2) عمود نقل الحركة في النموذج الأساسي لآلية نقل القدرة إلى مضخة تزويد الطائرات بالوقود، ويبلغ طوله (90cm) وقطره (50mm). (Efremov,1974).



الشكل (2) النموذج الأساسي لآلية نقل القدرة إلى مضخة تزويد الطائرات بالوقود

(a) عدد دورات (1500r.p.m) مع حمل

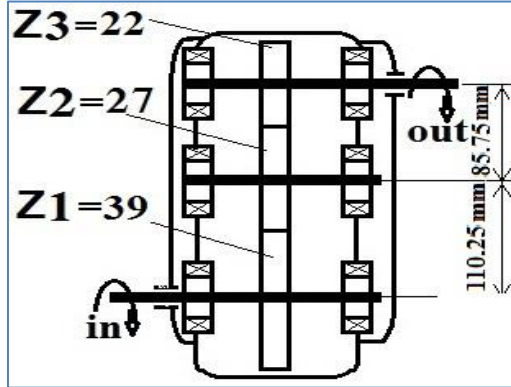
(b) عدد دورات (782r.p.m) بدون حمل

- توجد توافقية على مثل واحد (1X) عند عدد دورات (1515r.p.m)، تعطي مؤشراً واضحاً على وجود خلوص (Lossness) في آلية نقل القدرة إلى المضخة وتدل على حدوث انحناء في مركز عمود نقل الحركة (حسب ماتم ذكره في مقدمة البحث)، كما تبين أن السرعات غير ثابتة لأنها تتعلق بعدد دورات المحرك أثناء العمل ولا يمكن ضبطها بدقة.

2-3- التعديل التصميمي لآلية نقل القدرة إلى مضخة تزويد الطائرات بالوقود:

- إن تقليل بارامترات الاهتزازات وعدم الوصول إلى السرعة الحرجة لعمود نقل الحركة الموافقة لسرعة تردد الطنين في النموذج الأساسي المدروس لآلية نقل القدرة إلى مضخة تزويد الطائرات بالوقود، تطلب إجراء تعديل تصميمي على آلية نقل القدرة إلى مضخة تزويد الطائرات بالوقود في النموذج الأساسي المدروس تضمن هذا التعديل تنفيذ مايلي:

1- تصنيع علبة سرعة مساعدة بسيطة مع الغطاء موضحة في الشكل (6).



الشكل (6) المخطط الكينماتيكي لعلبة السرعة المساعدة في النموذج

المعدل لآلية نقل القدرة إلى المضخة

2- تركيب وحدة نقل قدرة PTO بديلة عن وحدة نقل القدرة في النموذج الأساسي، يعتمد مبدأ عملها في نقل الحركة على وصلة مسننية داخلية، مع وجود ذراع للفصل و الوصل.



الشكل (4) جهاز قياس وتحليل الاهتزاز في أجزاء آلية نقل القدرة إلى

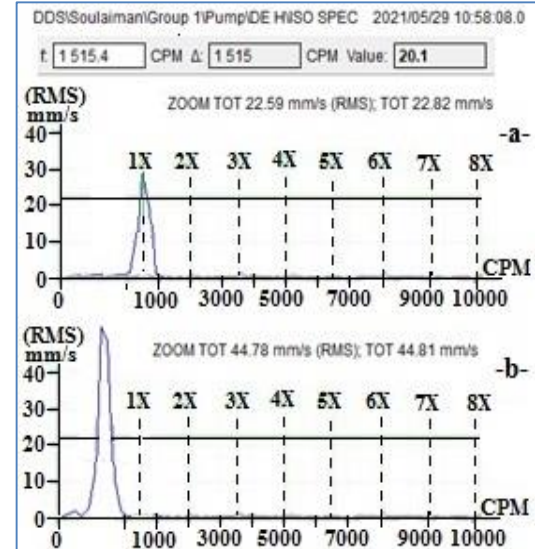
مضخة تزويد الطائرات بالوقود طراز Adash4900Vibrio

تم قياس الاهتزاز على عمود دوران مضخة تزويد

الطائرات بالوقود، وحصلنا على النتائج التالية:

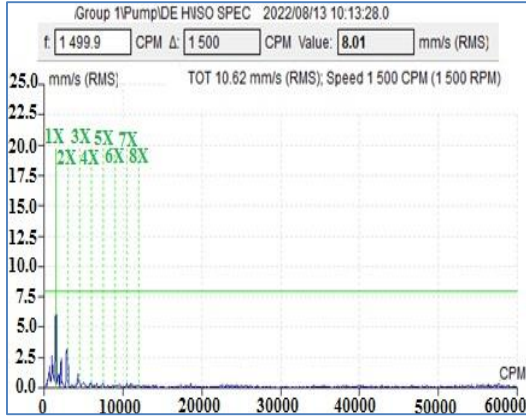
1- بدون حمل: عند عدد دورات (782r.p.m) وصلت سرعة الاهتزاز في بعض النقاط إلى (44,81mm/s) كما يظهر في الشكل (5-b).

2- مع حمل: عند عدد دورات (1515r.p.m) وصلت سرعة الاهتزاز إلى (22,82mm/s) كما يظهر في الشكل (5-a).



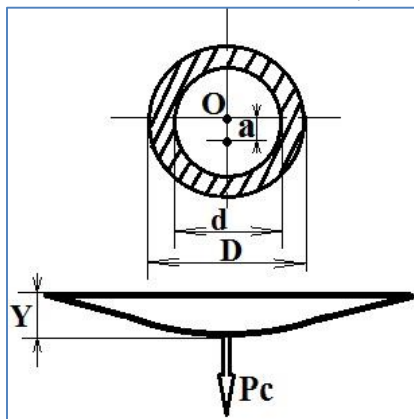
الشكل (5) سرعة الاهتزاز على المضخة عند حالتها عمل

3- مع حمل عند عدد دورات (1500r.p.m) أصبحت سرعة الاهتزاز في نقاط أخرى (10,62mm/s)، كما يظهر في الشكل (9)، بينما كانت في النموذج الأساسي (22,82mm/s) كما بينها في نتيجة سابقة.



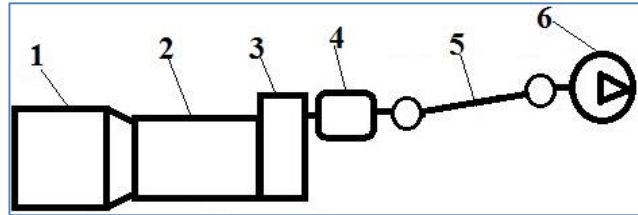
الشكل (9) طيف الاهتزاز على المضخة بالاتجاه المحوري في النموذج المعدل لآلية نقل القدرة عند (1500r.p.m)

4- السرعة الحرجة لعمود نقل الحركة غير المتوازن في آلية نقل القدرة إلى مضخة تزويد الطائرات بالوقود:
إن انحناء عمود نقل الحركة إلى المضخة لا يتم بسبب تأثير قوى خارجية موجودة على جسم العمود وإنما بسبب وجود كتلة لامركزية على محيطه تسبب أثناء دورانه بسرعة عالية قوة طرد مركزية تتضح في الشكل (10) حيث يحدد موضع العمود تحت الحمل الساكن في هذه الحالة (الوزن) (Aaron et al.,1975).



الشكل (10) تأثير قوة الطرد المركزية (Pc) وحمل الوزن في انحناء عمود نقل الحركة

3- تقليل طول عمود نقل الحركة بمعدل (33%) وزيادة قطره بمقدار (2mm) حيث أصبح طوله (30cm) وقطره (52mm) عما هو عليه في النموذج الأساسي. يظهر في الشكل (7) النموذج المعدل لآلية نقل القدرة إلى مضخة تزويد الطائرات بالوقود.



الشكل (7) النموذج المعدل لآلية نقل القدرة إلى مضخة تزويد الطائرات بالوقود

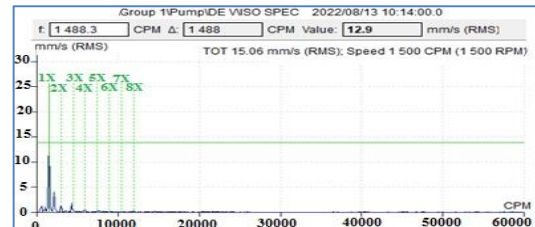
وفيه: 1- محرك. 2- علبة سرعة رئيسية. 3- علبة سرعة مساعدة مضافة. 4- وحدة نقل القدرة PTO بتصميم جديد. 5- عمود نقل الحركة المعدل بطول (30cm) وقطر (52mm). 6- المضخة.

3-3 قياس الاهتزازات في النموذج المعدل لآلية نقل القدرة إلى مضخة تزويد الطائرات بالوقود:

□ تم قياس الاهتزاز على عمود دوران المضخة في النموذج المعدل لآلية نقل القدرة عبر عمود نقل الحركة المعدل وحصلنا على النتائج:

- 1- مع حمل عند عدد دورات (1500r.p.m)
- 2- بلغت سرعة الاهتزاز (RMS)

(Root.Mean.Square) أي قيمة جذر المربعات الوسطي لسرعة الاهتزاز (القيمة المنتجة) في بعض النقاط (15,06mm/s)، كما يظهر في الشكل (8).



الشكل (8) طيف الاهتزاز عند القياس على المضخة في النموذج المعدل لآلية نقل القدرة عند (1500r.p.m)

$$\begin{aligned}
& \rightarrow m \cdot w^2 \cdot y + m \cdot w^2 \cdot a = C \cdot g \cdot y \cdot \frac{E \cdot I}{L^3} \\
& \rightarrow m \cdot w^2 \cdot a = C \cdot g \cdot y \cdot \frac{E \cdot I}{L^3} - m \cdot w^2 \cdot y \\
& \rightarrow m \cdot w^2 \cdot a = y \cdot \left[C \cdot g \cdot \frac{E \cdot I}{L^3} - m \cdot w^2 \right] \\
& \rightarrow y = \frac{m \cdot w^2 \cdot a}{C \cdot g \cdot \frac{E \cdot I}{L^3} - m \cdot w^2} \quad (3)
\end{aligned}$$

□ يحدث الانهيار عندما ($y = \infty$) (نظرياً) أي أن:

$$\begin{aligned}
C \cdot g \cdot \frac{E \cdot I}{L^3} - m \cdot w^2 &= 0 \\
\rightarrow w^2 &= C \cdot g \cdot \frac{E \cdot I}{m \cdot L^3}
\end{aligned}$$

$$w_{cr} = \sqrt{C \cdot g \cdot \frac{E \cdot I}{m \cdot L^3}} \quad (4) \quad \text{وتكون:}$$

$$w_{cr} = \frac{\pi \cdot n_{cr}}{30} = 9.55 \cdot n_{cr} \quad (5)$$

حيث أن:

n_{cr} : السرعة الحرجة لعمود نقل الحركة (r.p.m).
من العلاقات (4) و (5) نكتب:

$$\frac{\pi \cdot n_{cr}}{30} = \sqrt{C \cdot g \cdot \frac{E \cdot I}{m \cdot L^3}} \quad (6)$$

ونستنتج علاقة السرعة الحرجة لعمود نقل الحركة لتصبح كمايلي:

$$n_{cr} = \frac{30}{\pi} \sqrt{C \cdot g \cdot \frac{E \cdot I}{m \cdot L^3} \times 10^2} \quad (7)$$

$$m = \frac{\pi}{4} \cdot (D^2 - d^2) \cdot L \cdot \rho \quad \text{لعمود المفرغ.}$$

$$m = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot L \cdot \rho \quad \text{لعمود المصمت.}$$

يتم تعويض المعطيات في العلاقة (7) ويؤخذ بعين الاعتبار أن الإجهادات موزعة على عمود الكردان بشكل منتظم لذا فإن:

$$C = \frac{384}{5} \quad \text{لعمود الحر، } C = 384 \quad \text{لعمود المقيد.}$$

5-النتائج والمناقشة) Results and Discussion:

1-5 حساب السرعة الحرجة لعمود نقل الحركة إلى مضخة تزويد الطائرات بالوقود في النموذج الأساسي لآلية نقل القدرة:

- ينتج عن هذه الكتلة غير المتوازنة قوة طرد مركزي (Pc) تؤثر بشكل جانبي على عمود نقل الحركة وتعطيه انحرافاً مقداره (y)، وتكون المسافة اللامركزية في انزياح مركز الثقل (a).

تؤدي (Pc) وحمل الوزن أثناء دوران عمود نقل الحركة إلى ظهور إجهادات انحناء إضافية على العمود وحتى يتم التغلب على هذه الإجهادات يجب اختيار معدن العمود من الفولاذ متوسط الكربون (Medium Steel) المقاوم للانحناء.

□ تحسب القوة (Pc) من العلاقة التالية:

$$Pc = m \cdot w^2 \cdot R \quad (1)$$

حيث أن:

m: كتلة عمود نقل الحركة (Kg).

W: السرعة الزاوية للعمود (rad/sec).

R: بعد مركز ثقل العمود عن المركز النظري لدورانه (R=Y+a).

□ كما تعطى قوة مقاومة إجهاد الانحناء بالعلاقة (Gawish,2007,383):

$$P = C \cdot y \cdot \frac{E \cdot I}{L^3} \quad (2)$$

حيث أن: P: قوة مقاومة الانحناء (N).

L: طول عمود الكردان (m).

E: عامل المرونة (Modulus of elasticity)

أو عامل يونغ (Kg/cm²).

I: عزم العطالة المحوري (cm⁴).

C: ثابت يتعلق بشكل عمود نقل الحركة ومقطعه وطريقة تثبيته وتوزع العزوم عليه.

□ يجب عند تصميم عمود نقل الحركة أن يحقق

معدن العمود المتانة اللازمة بحيث تكون قوة مقاومته

للانحناء أكبر أو تساوي قوة الطرد المركزية وبالتالي نكتب:

$$Pc = P \rightarrow C \cdot g \cdot y \cdot \frac{E \cdot I}{L^3} = m \cdot w^2 \cdot R$$

$$m \cdot w^2 \cdot (y + a) = C \cdot y \cdot \frac{E \cdot I}{L^3}$$

$$n_{cr2} = 61009 \text{ r.p.m}$$

□ يكون بالنتيجة معامل الزيادة (K) في السرعة الحرجة (التي تتوافق مع الزيادة الحادة الموافقة لاتساع الاهتزازات) التي يثيرها عدم توازن عمود نقل الحركة إلى مضخة تزويد الطائرات بالوقود:

$$K = \frac{n_{cr2}}{n_{cr1}} = \frac{61009}{8767.88} = 6.96$$

- إن زيادة العامل (K) بمعدل (6.96) يضمن إطالة عمر خدمة عمود نقل الحركة وعدم انهياره في النموذج المعدل مقارنة بالنموذج الأساسي.

□ عند تصميم عمود نقل الحركة يجب أن تكون السرعة الفعلية (n) التي يدور بها أقل من السرعة الحرجة (n_{cr}) أي ($n < n_{cr}$) بنسبة أمان تساوي (Podolskiy, 2014, 27):

$$K_n = \frac{n_{cr2}}{n_{max}} = 1.2 \sim 2 \quad (8)$$

حيث أن:

n_{max} : السرعة العظمى الخارجة من وحدة نقل القدرة PTO للنموذجين الأساسي أو المعدل لآلية نقل القدرة إلى المضخة. ونختار في حساباتنا من (8):

$$K_n = \frac{n_{cr2}}{n_{max}} = 1.65 \quad (9)$$

- بالحساب التصميمي لآلية نقل القدرة من المحرك إلى مضخة تزويد الطائرات بالوقود في النموذجين الأساسي والمعدل بالاعتماد على الشكلين (3) و (6) والعلاقة (9) حصلنا على النتائج المبينة في الجدول (1).

جدول (1) نتائج قيم السرعة الحرجة (n_{cr}) لعمود نقل الحركة إلى مضخة تزويد الطائرات بالوقود في النموذجين الأساسي والمعدل لآلية نقل القدرة.

$$n_{cr} = \frac{30}{\pi} \sqrt{C \cdot g \cdot \frac{E \cdot I}{m \cdot L^3}} \times 10^2 \quad (7)$$

$C = \frac{384}{5}$ العمود حر، وعامل المرونة [13]:

$$E = 2.04 \times 10^6 \text{ Kg/cm}^2$$

$$D=50\text{mm}, d=45\text{mm}, L=90\text{cm}$$

العمود مفرغ تكون: $I = \frac{\pi}{64} (D^4 - d^4)$

$$I = \frac{\pi}{64} ((5)^4 - (4.5)^4) = 10.55 \text{ cm}^4$$

$$m = \frac{\pi}{4} \cdot (D^2 - d^2) \cdot L \cdot \rho \quad \text{وكتلته:}$$

ρ : الوزن النوعي لمعدن عمود نقل الحركة ويساوي: (7.8 gr/cm^3)

$$m = \frac{\pi}{4} \cdot ((5)^2 - (4.5)^2) \times 90 \times 7.85$$

$$m = 2635.7 \text{ gr} = 2.6357 \text{ Kg}$$

بالتعويض في (7) تصبح السرعة الحرجة تساوي:

$$n_{cr1} = \frac{30}{\pi} \sqrt{\frac{384}{5} \times 9.8 \times \frac{2.04 \times 10^6 \times 10.55}{2.6357 \times (90)^3}} \times 10^2$$

$$n_{cr1} = 8767.88 \text{ r.p.m}$$

2-5- حساب السرعة الحرجة لعمود نقل الحركة إلى مضخة تزويد الطائرات بالوقود في النموذج المعدل لآلية نقل القدرة:

$$n_{cr} = \frac{30}{\pi} \sqrt{C \cdot g \cdot \frac{E \cdot I}{m \cdot L^3}} \times 10^2 \quad (7)$$

$C = \frac{384}{5}$ العمود حر، وعامل المرونة:

$$E = 2.04 \times 10^6 \text{ Kg/cm}^2$$

$$D=52\text{mm}, L=30\text{cm}$$

العمود مصمت تكون: $I = \frac{\pi}{64} \times D^4$

$$I = \frac{\pi}{64} (5.2)^4 = 35.89 \text{ cm}^4$$

$$m = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot L \cdot \rho \quad \text{وكتلته:}$$

ρ : الوزن النوعي لمعدن عمود نقل الحركة ويساوي: (7.85 gr/cm^3)

$$m = \frac{\pi}{4} \cdot (5.2)^2 \times 30 \times 7.85$$

$$m = 5001 \text{ gr} = 5 \text{ Kg}$$

بالتعويض في العلاقة (7) تصبح السرعة الحرجة:

$$n_{cr2} = \frac{30}{\pi} \sqrt{\frac{384}{5} \times 9.8 \times \frac{2.04 \times 10^6 \times 35.89 \times 100}{5 \times (30)^3}}$$

الجدول (1) نتائج قياس بارامترات اهتزاز النموذج الأساسي لآلية نقل القدرة إلى مضخة تزويد الطائرات بالوقود

ncr ₂ r.p.m	ncr ₁ r.p.m	nm ₂ r.p.m	nm ₁ r.p.m	n _e r.p.m
1857	1816	1126	1101	900
2062	2022	1250	1226	1000
2270	2225	1376	1349	1100
2476	2422	1501	1468	1200
2682	2623	1626	1590	1300
2889	2826	1751	1713	1400
3095	3027	1876	1835	1500

- حيث أن:

(n_{cr1}): السرعة الحرجة لعمود نقل الحركة في النموذج الأساسي.

(n_{cr2}): السرعة الحرجة لعمود نقل الحركة في النموذج المعدل، n_e: عدد دورات المحرك.

n_{m1}: عدد دورات عمود المضخة في النموذج الأساسي.

n_{m2}: عدد دورات عمود المضخة في النموذج المعدل.

- يتضح من الجدول (1) أنه عند عدد دورات عمل المحرك (n_e=1200r.p.m) نحصل على عدد دورات عمود المضخة

(n_{m1}=1468r.p.m)، والسرعة الحرجة لعمود نقل الحركة

(n_{cr}=2422r.p.m) في النموذج الأساسي لآلية نقل القدرة إلى

المضخة، أما في النموذج المعدل نحصل على عدد دورات

عمود المضخة (n_{m2}=1501r.p.m) وسرعة حرجة

(n_{cr}=2476r.p.m) لعمود نقل الحركة، وبالتالي زيادة عدد

دورات عمود المضخة والسرعة الحرجة في النموذج المعدل

بنسبة (1.022%) مقارنة بالنموذج الأساسي عند عدد الدورات نفسها تقريباً.

- ومن تجارب قياس الاهتزازات في النموذجين الأساسي والمعدل لآلية نقل القدرة إلى المضخة حصلنا على النتائج

المبينة في الجدولين (2) و(3).

الجدول (2) نتائج قياس بارامترات اهتزاز النموذج الأساسي لآلية نقل القدرة إلى مضخة تزويد الطائرات بالوقود

DDS \Group1 \Pump			
Name	Value1	Value2	Unit
Vibration Speed (V)RMS	44.81	41.78	mm/s
Vibration acceleration(g)	4.31	14.3	(g) or mm/s ²
Vibration Speed (V)RMS	22.82	22.59	mm/s
Vibration acceleration(g)	3.81	13.2	(g) or mm/s ²

- حيث أن: V(RMS): سرعة الاهتزاز (mm/s).

(g): تسارع الاهتزاز (mm/s²).

- يتضح من الجدول (2) أن قيم سرعة الاهتزاز (V) وتسارع الاهتزاز (g) عند القياس على أجزاء آلية نقل القدرة ومنها المضخة في النموذج الأساسي مرتفعة عند عدد دورات (1500r.p.m).

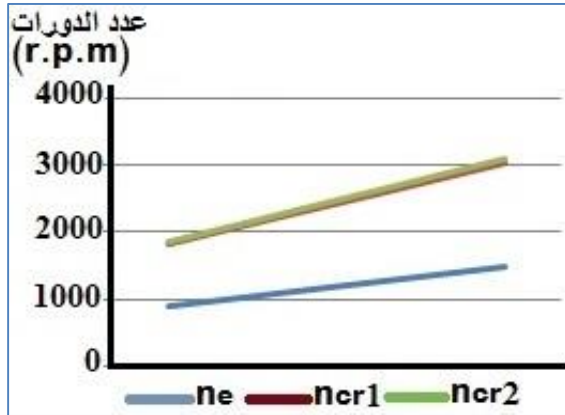
الجدول (3) نتائج قياس بارامترات اهتزاز النموذج المعدل لآلية نقل القدرة إلى مضخة تزويد الطائرات بالوقود

DDS \Group2 \Pump			
Name	Value1	Value2	Unit
Vibration Speed (V)RMS	10.62	12.5	mm/s
Vibration acceleration (g)	2.02	4.09	g
Vibration Speed (V)RMS	16.4	15.9	mm/s
Vibration acceleration (g)	1.63	0.61	g

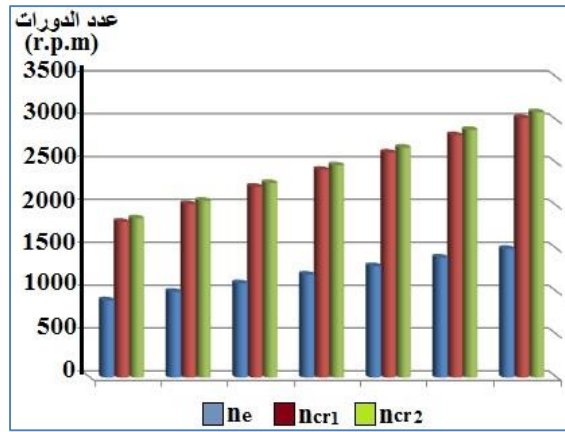
- حيث أن:

V(RMS): سرعة الاهتزاز (mm/s).

(g): تسارع الاهتزاز (mm/s²).



الشكل (12) زيادة السرعة الحرجة (n_{cr2}) لعمود نقل الحركة في النموذج المعدل لآلية نقل القدرة إلى المضخة بالنسبة للنموذج الأساسي (n_{cr1})، وعدد دورات المحرك (n_e)



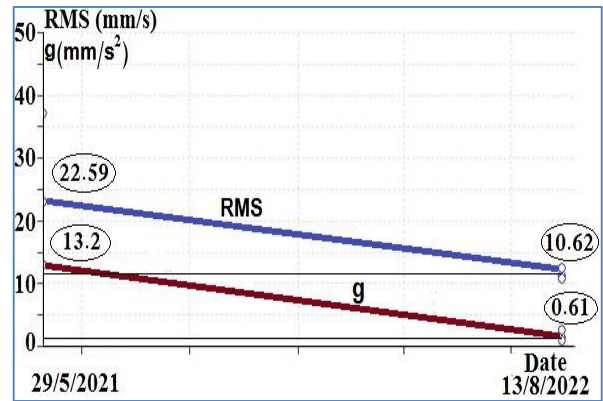
الشكل (13) زيادة السرعة الحرجة (n_{cr2})، (n_{cr1})، (n_e)

و يوضح الشكلين (14) و (15) أيضاً ازدياد السرعة الحرجة لعمود نقل الحركة في النموذج المعدل، و يعطي دليلاً واضحاً على زيادة عامل الأمان ($K_n = 1.65$) من الوصول للسرعة الحرجة ما يضمن إطالة عمر عمود نقل الحركة إلى المضخة وعدم انهياره على الحمولات الاهتزازية عند عدد دورات العمل نفسها.

- يتضح من الجدول (3) أن قيم سرعة وتسارع الاهتزاز عند عدد دورات (1500r.p.m) في النموذج المعدل لآلية نقل القدرة إلى المضخة أقل مما كانت عليه في النموذج الأساسي عند عدد الدورات نفسه.

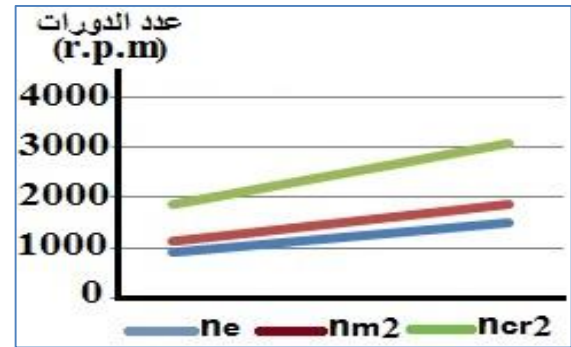
6- الاستنتاجات:

(1) - نوقشت نتائج التعديل التصميمي لآلية نقل القدرة على عمود نقل الحركة إلى المضخة حيث انخفضت قيمتي سرعة وتسارع الاهتزاز على عمود المضخة أثناء عملها مع حمل من (22,82mm/s) و (14,3mm/s²) في النموذج الأساسي إلى (10,62mm/s) و (4,09mm/s²) في النموذج المعدل عند عدد دورات العمل نفسها (1500r.p.m) كما يبين الجدولين (2) و (3)، ويوضح الشكل (11).

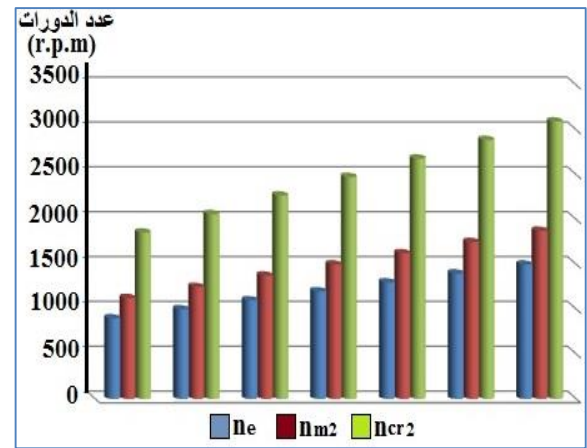


الشكل (11) انخفاض سرعة وتسارع الاهتزاز في تجارب اختبار النموذجين الأساسي والمعدل مع الزمن عند (1500r.p.m)

(2) - إن تقليل طول عمود نقل الحركة من (90Cm) في النموذج الأساسي إلى (30Cm) في النموذج المعدل لآلية نقل القدرة إلى مضخة تزويد الطائرات بالوقود أي بمعدل (33%) أدى إلى زيادة العامل ($K = \frac{n_{cr2}}{n_{cr1}}$) بمعدل (1.022) عند عدد دورات (1500r.p.m)، كما يبين الجدول (1) والشكلين (12) و (13).



الشكل (14) زيادة السرعة الحرجة (n_{cr2}) لعمود نقل الحركة في النموذج المعدل لألية نقل القدرة إلى المضخة بالنسبة لعدد دورات عمود المضخة (n_{m2})، وعدد دورات المحرك (n_e)



الشكل (15) معدل زيادة السرعة الحرجة (n_{cr2}) بالنسبة لكل من (n_{m2}) و (n_e)

(3) - تبين بالحساب التجريبي أن قيمة السرعة الحرجة لعمود نقل الحركة إلى المضخة تتناسب طردياً مع قطر العمود فتزداد بزيادته، وعكساً مع

مربع طوله فكلما زاد الطول نقصت قيمة هذه السرعة، وعليه تم اختيار قطر أكبر بمقدار (2mm) في النموذج المعدل للإبقاء على تردد السرعة الحرجة فوق قيمة سرعة العمل لعمود نقل الحركة إلى المضخة، مما يزيد من عوامل الأمان أثناء استثمار منظومة تزويد الطائرات بالوقود.

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

7-References:

- [1] Albert, A. (2012), "Condition monitoring of gear systems using vibration analysis", p. 248.
- [2] Arnold, V. (1979), "Mathematical methods of classical mechanics", Moscow: Russia, Glavnaya redaktsiya fiziko-matematicheskoy literatury, p. 432
- [3] Grigorev, V. (2018), "Vibration of power units Handbook", Series: Materials Science and Engineering 386, 012005, p. 464-512, 34567890AAE IOP, Leningrad: Russia, doi: 10.1088/1757-899X/386/1/012005
- [4] Gusarov, A. (1990), "Dynamics and balancing of flexible rotors", Moscow: Russia, p. 152.
- [5] Lyakhov, A. (2017), "Computational Conditionality of the rotor balancing", Nizhny Novgorod University, Nizhny Novgorod: Russia, 792 pp 135-146
- [6] Nikiforov, A. (2013), "State of balancing rotors problems", Journal of Scientific and Technological Development 4(68) p. 20-28.
- [7] Pasynkova, I. (2014), "Dynamics of precession motion of unbalanced rotor", Saint-Petersburg: Izdatelstvo Sankt-Peterburgskogo University, Russia, p. 238
- [8] Seoud, A, and Khalil, M. (2012), "An experimental study on the diagnostic capability of vibration analysis for wind turbine planetary gearbox. International ", Journal of Modern Engineering Research. 2:3, p. 667-675.
- [9] Aaron, D, Walter, M and Charles, W. (1975), "Machine Design-Theory and practice", New York: USA.
- [10] Alugongo A. (2018), "Parametric vibration of a cardan shaft and sensitivity analysis ", Journal of Vibration and Control, doi: 978-988-14049-0-9 ISSN: 2078-0958, Vol II WCECS, San Francisco: USA.
- [11] Efremov, V. (1974), "refuller Tz-500 Description, operating, and maintenance instructions", Minsky: Russia, Vol. II No. (3606).
- [12] Ellfi, G, Nathy, F, and Adams, R (2001), "Critical Speed and Unbalance Response Analysis - Vibration Analysis, introduction to rotor dynamics", VA22903-1560
- [13] Gawish, M. (2007), "Machine Design", Damascuse university, Damascuse: Syria. 1pp 383
- [14] Mure, K and Robert, W. (2005), "Vibration Absorbers: A Review of Applications in Interior Noise Control of Propeller Aircraft". Journal of Vibration and Control Vol. 10: 1221-1237.
- [15] Podolskiy, C. (2014) "Physical nature and conditions of initiation of direct and reverse precession of rotor Teoriya mekhanizmov i mashinvol". 121pp 27-40