

## تطوير نهج صيانة تنبؤية قائم على معالجة الأمواج الصوتية بخوارزمية فورييه متعددة التناقص

م. إبراهيم حمد \*

د.م. ماجد حيا \*\*\*

د.م. طلال حمود \*\*

\* طالب دكتوراه، قسم الإلكترونيات والاتصالات، كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية،  
جامعة دمشق.

\*\* أستاذ مساعد في قسم الإلكترونيات والاتصالات، كلية الهندسة الميكانيكية  
والكهربائية، جامعة دمشق.

\*\*\* باحث رئيسي في المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا، دمشق.

### الملخص

يُقدّم البحث الحالي نهج صيانة تنبؤية قائم على تسجيل نماذج من الأمواج الصوتية الصادرة عن الآلات المطلوب التنبؤ بأعطالها، ومن ثم تحول بيانات الأمواج المسجلة من المجال الزمني إلى المجال الترددي، وذلك باستخدام تحويل فورييه متعددة التناقص Fourier Multi-Tapering، على أن تقارن ترددات المطالات الأعظمية الظاهرة بمنحنيات الاستجابة الترددية الناتجة عن التحويل مع الترددات المرجعية المميزة لكافة الأعطال المحتمل حصولها بالآلة المعنية، وبحيث تشير التطابقات المسجلة بالترددات لحالة أو لحالات تعطل محددة تماماً. ولاختبار جدوى العمل بالنهج المقدم تم تطبيقه على محركات كهربائية تحريضية مجهولة الحالة الفنية، وبالنتيجة تحققت إمكانية التنبؤ بالعديد من الأعطال القائمة بتلك المحركات. وحيث أن تحويل فورييه متعددة التناقص لم يدرج ضمن أي نهج صيانة تنبؤية

**الكلمات المفتاحية:** الصيانة التنبؤية، مراقبة الحالة، التنبؤ بأعطال المحركات التحريضية، الصيانة القائمة على معالجة الأصوات، الصيانة القائمة على تحويل فورييه، تحويل فورييه للأمواج الصوتية، تحويل فورييه متعدد التناقص، تحليل أعطال المحركات الكهربائية.

# Development of a Predictive Maintenance Process Based on Fourier Multi-Tapering of Acoustic Waves

Eng. Ibrahim Hamad \*

Dr. Talal Hammod \*\*

Dr. Majed Haiba \*\*\*

\* PhD Student, Department of Electronics and Communications  
Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering,  
Damascus University.

\*\* Assistant Teacher, Department of Electronics and Communications  
Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering,  
Damascus University.

\*\*\* Main Researcher, Higher Institute of Science and Technology,  
Damascus, Syria.

## Abstract

The current research presents a predictive maintenance process based on recording of acoustic waves emitted from machines, then the recorded waves are transmitted from time to frequency domain using Fourier multi-tapering algorithm, then, frequencies of maximum amplitudes resulted from frequency responsive curves are compared with the theoretical frequencies of the expected faults, thus every matching indicates a specific fault or faults. For validating the presented process, it was applied on three induction motors which are in unknown technical conditions. As a result, the possibility of predicting several faults was achieved indicating the validity of the process. Since Fourier Multi-tapering has not been used previously in any known predictive maintenance process, to the best of the researcher's knowledge, it's current used can be seen as original contribution to the field of knowledge.

**Key words:** Predictive maintenance, Condition Monitoring, Fault prediction of induction motors, Acoustic based maintenance, Fourier transformation of acoustic waves, Multi-Tapering Fourier transformation, Fault analysis of electrical motors.

## 1. مقدمة:

تعتبر الصيانة التنبؤية Predictive Maintenance أحد أساليب إدارة الصيانة الحديثة والتي بدأ تطبيقها في الدول المتقدمة مع نهايات السبعينات وبدايات الثمانينات من القرن العشرين. تعتمد الصيانة التنبؤية على مبدأ مراقبة الحالة Condition Monitoring وذلك بهدف الحصول على معلومات عن الحالات الفنية للآلات والتنبؤ بأنواع ومواعيد الأعطال قبل حدوثها، ما يساعد على اتخاذ القرارات المناسبة بخصوص التوقيت الأنسب لتنفيذ الصيانات، وتنفيذ تلك الصيانات دون التأثير على خطط الإنتاج، ودون ترتيب خسائر بسبب التوقفات الناتجة عن الأعطال المفاجئة [1,2]. من بين التقانات المتاحة لتنفيذ الصيانة التنبؤية تعد تقانة قياس وتحليل الأمواج الصوتية من بين الأهم والأكثر انتشاراً [3,4,5]. ووفقاً لما هو مبين بالشكل (1) تقوم تلك التقانة على تحصيل الأمواج الصوتية ومعالجتها بشكل دوري بهدف استنتاج التغيرات الحاصلة على سمات مميزة (التغيرات الحاصلة على البصمات الصوتية)، حيث تحدد خطط الصيانة بناءً على نتائج المقارنة بين البصمات اللاحقة والبصمات المرتبطة بتشغيل الآلات وهي بوضعها المثالي [6].

تسجيل ومعالجة نماذج من الأمواج الصوتية الصادرة عن الآلات حال وضعها بالاستثمار (وهي جديدة) وذلك بهدف استخلاص السمات المميزة المستهدفة

التسجيل والمعالجة الدورية لنماذج من الأمواج الصوتية الصادرة عن نفس الآلات وذلك بهدف استخلاص السمات المميزة لتلك الأمواج

تقييم التغيرات الحاصلة على الحالات الفنية للآلات من خلال دراسة التغيرات الحاصلة على السمات، وتحديد برامج الصيانة بناءً على النتائج

الشكل (1): المخطط الانسيابي العام لتحليل أعطال الآلات بالاعتماد على الأمواج الصوتية

أما فيما يتعلق بالمعالجات الرياضية التي تنفذ عند العمل بمرجعية المخطط الانسيابي أعلاه، فتشير المراجع المختصة بالتوفر عدد كبير من الطرق المتاحة، حيث تؤكد تلك المراجع على تميز طرق المعالجة القائمة على تحويل نماذج الأمواج الصوتية المسجلة إلى المجال الطيفي [7] Spectrum Analysis، ما يسمح باستنتاج التغيرات الحاصلة على الحالات الفنية للآلات من خلال دراسة التغيرات الحاصلة على منحنيات الاستجابة الترددية الخاصة بها. ولتنفيذ التحويل أعلاه لا بد من استعمال خوارزمية تحويل فورييه السريع Fast Fourier Transform إن كانت المعطيات المطلوب معالجتها مستقرة Stationary، واستعمال أحد خوارزميات التحويل التالية إن كانت المعطيات المطلوب معالجتها غير المستقرة Non-stationary، علماً بأن المعطيات غير المستقرة تتميز عن المعطيات المستقرة بكون سماتها الإحصائية الأساسية، مثل المتوسط والانحراف المعياري، متغيرة مع الزمن [8]:

- Fourier Segmented Data (FSD): عبارة عن خوارزمية تحويل قائمة على حساب متوسط الأطياف الترددية الناتجة عن تطبيق تحويل فورييه السريعة على نوافذ متعددة متساوية الأطوال من المعطيات الجاري معالجتها، كلاً على حدة، أخذين بعين الاعتبار وجود تراكب overlapping من مرتبة معينة بين تلك النوافذ.
- Fourier Multi-Taper (FMT): عبارة عن خوارزمية قائمة على حساب متوسط الأطياف الترددية الناتجة عن تطبيق تحويل فورييه السريعة على نوافذ متعددة متناقصية بشكل تدريجي بأطوالها من المعطيات الجاري معالجتها.
- التحويل المويجي Wavelet Transform.

والسؤال الذي يطرح نفسه ضمن السياق أعلاه هو: هل تتميز أحد خوارزميات التحويل أعلاه عن باقي الخوارزميات من حيث قدرتها على الوصول للتمثيل الطيفي الأكثر دقة، وبالتالي من حيث قدرتها على التنبؤ بالأعطال القائمة بالآلات بدقة أكبر؟ وحيث أن المراجع المختصة لا تشمل على إجابة صريحة عن هذا السؤال، فقد ظهرت الحاجة للبحث عن تلك الإجابة من خلال عمل بحثي مناسب، وهذا ما حَرَّضَ فكرة البحث الحالي الهادف لتطوير مرجعية ما تمكن من تحديد الخوارزمية الأنسب للتحويل الطيفي

للمعطيات الصوتية المسجلة بهدف تحليل وكشف الأعطال، أخذين بعين الاعتبار أن الأعمال التجريبية اللازمة لذلك ستنفذ على محركات كهربائية تحريضية من الأنواع المستعملة بألات التشغيل المبرمج.

## 2. الآلية المُعتمَدة لتحقيق أهداف البحث:

تقوم الآلية المُعتمَدة لتحقيق الهدف الأساسي لهذا البحث على مقارنة النتائج المستخلصة من خلال تطبيق أحد خوارزميات التحويل أعلاه على نموذجي أصوات مسجلين لمحرك بحالة سليمة ولنفس المحرك بعد تعطيله بشكل مفتعل، وبعد ذلك تحويل البيانات لكل تسجيل على حدة إلى المجال الترددياً أخذين بعين الاعتبار تكرار هذه الخطوة باستعمال خوارزميات التحويل المذكورة أعلاه كافة، ومن ثم العمل على دراسة منحنيات الاستجابة الترددية الناتجة عن عمليات التحويل بهدف تحديد المنحني الأكثر احتواءً على المركبات الترددية المميزة لحالة التعطل المفتعل (وفقاً للقيم المرجعية التي تحسب بمعادلات معتمدة، وفقاً لما سيقدم بفقرة لاحقة)، وبحيث يتم التعامل مع خوارزمية التحويل المولدة لذلك المنحني على أنها الأنسب لتنفيذ عملية التحويل الطيفي للمعطيات الصوتية المسجلة بهدف تحليل وكشف الأعطال، ويبين الشكل (2) المراحل التفصيلية للآلية المعتمدة.

سجل نموذج من الأمواج الصوتية الصادرة عن محرك كهربائي تحريضي سليم، ونموذج من الأمواج الصوتية الصادرة عن نفس المحرك بعد تعديله من خلال إحداث عطل مفتعل بأحد رولماناته



تحويل نموذجي الأمواج الصوتية من الصيغة التماثلية إلى الصيغة الرقمية ومن ثنائي القناة إلى أحادي القناة وتمرير البيانات الناتجة على فلتر مناسب لتخليصها من



نموذجي الأمواج الناتجين عن المعالجات أعلاه إلى المجال الطيفي، وذلك باستخدام أحد خوارزميات التحويل بالفقرة الأولى من هذه الورقة البحثية، وبحيث يتم الحصول على منحنيي الاستجابة الترددية لنموذجي الأمواج



يد الترددات المرجعية الموافقة لحالة العطل المفتعل برولمان المحرك، وذلك بمرجعية المعادلات ملاحظات الإرشادية التي تقدمها المراجع المختصة، وفقاً لما هو مدرج بالفقرة (3) من هذه الورقة البحثية



تحديد المركبات الترددية الموافقة لتغيرات ملحوظة بمطالات منحنى الاستجابة الترددية العائد للمحرك المعدل، وذلك من خلال المقارنة بين ذلك المنحني والمنحني الموافق العائد للمحرك السليم



مقارنة المركبات الترددية الموافقة للتغيرات الملحوظة بمطالات منحنى الاستجابة الترددية العائد للمحرك المعدل مع الترددات المرجعية الموافقة لحالة العطل المفتعل برولمان المحرك، فإن توافقت فالخوارزمية المستعملة بالتحويل مناسبة وتعطي نتائج يمكن من خلالها تحديد الأعطال القائمة



الخطوات أعلاه أخذين بعين الاعتبار تغيير الخوارزمية المستعملة لتحقيق التحويل إلى المجال الترددي، فإن هذه الخطوة حتى استعمال كافة خوارزميات التحويل المتاحة، وبحيث يتم التعامل مع كل خوارزمية من التنبؤ بالأعطال القائم على أنها مناسبة لمعالجة التسجيلات الصوتية المسجلة بهدف التنبؤ بالأعطال

الشكل (2): الخطوات الخاصة بتحقيق الآلية المعتمدة لتحقيق أهداف البحث الحالي

### 3. أعطال المحركات التحريضية وتردداتها المرجعية: تصنف أعطال المحركات الأكثر

شيوفاً إلى ما يلي:

i. أعطال الرولمانات: يعتبر هذا النوع من الأعطال الأكثر انتشاراً حيث تعاني الرولمانات من أنواع الأعطال التالية، والتي يرتبط كل منها بقيمة تردد مرجعي يميزها عن غيرها من الأعطال، ما يتيح إمكانية التعرف على ذلك العطل بمرجعية تردده المميز:

• **عطل المدرج الخارجي (BPFO):** عبارة عن تشقق أو تكسر بجسم المدرج الخارجي أو اهتراء موضعي أو عام بمساره. ووفقاً لما هو مبين بالشكل (3)، يتميز الطيف الترددي الخاص بهذا النوع من الأعطال بوجود مطالات أعظمية متخامدة عند ترددات متوافقة لمضاعفات التردد المميز لعطل المدرج الخارجي، أي عند 1BPFO، وعند 2BPFO، وهكذا...، حيث:

$$BPFO = \frac{N}{2} * F * (1 - \frac{B}{P} * \text{Cos}\theta) \dots (1)$$

حيث: N عدد كرات أو دحارجالرولمان، F سرعة دوران المحرك بالثانية، B قطر الكرة أو الدحروج، P قطر دائرة خطوةالرولمان، و  $\theta$  زاوية تماسالرولمان.

- **عطل المدرج الداخلي (BPFI):** عبارة عن تشقق أو تكسر بجسم المدرج الداخلي أو اهتراء موضعي أو عام بمساره. ووفقاً لما هو مبين بالشكل (3)، يتميز الطيفالترددى الخاص بهذا النوع من العيوب بظهور مطالات أعظميةمتخامدة عند ترددات موافقة لمضاعفات التردد المميز لعطل المدرج الداخلي، أي عند 1BPFI، وعند 2BPFI، وهكذا...،بالإضافة لظهور توافقيات ترددها 1XRPM عند كل توافقيةBPFI،حيث:

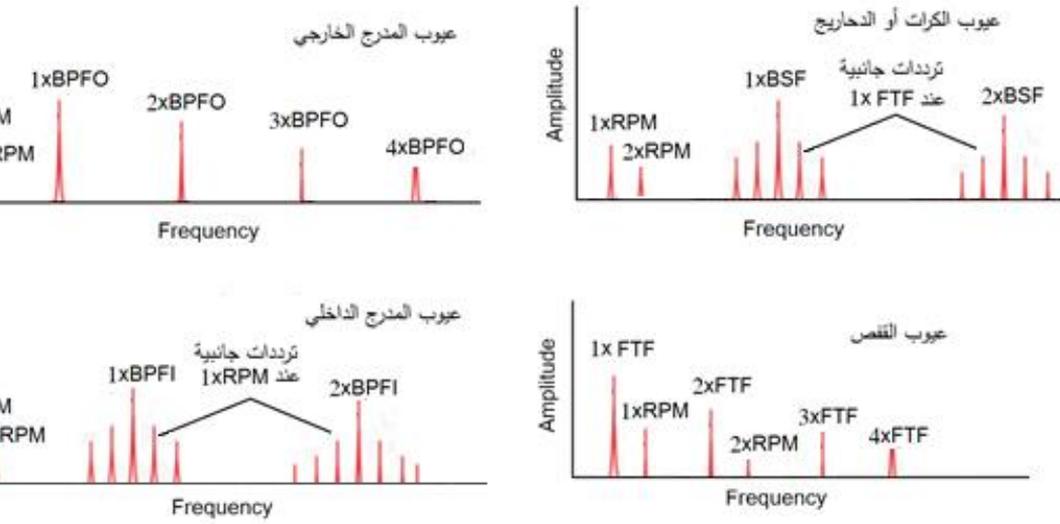
$$BPFI = \frac{N}{2} * F * (1 + \frac{B}{P} * \text{Cos}\theta) \dots (2)$$

- **عطل القفص (FTF):** عبارة عن تشوه أو تكسر أو اهتراء موضعي أو عام بجسم القفص، ووفقاً لما هو مبين بالشكل (3)، يتميز الطيفالترددى الخاص بهذا النوع من العيوب بظهور مطالات أعظميةمتخامدة عند ترددات موافقة لمضاعفات التردد المميز لعيب القفص، أي عند 1FTF، وعند 2FTF، وهكذا، حيث:

$$FTF = \frac{F}{2} * (1 - \frac{B}{P} * \text{Cos}\theta) \dots (3)$$

- **عطل الدحارج (BSF):** عبارة عن تشوه أو اهتراء موضعي أو عام بدحارج الرولمان، ووفقاً لما هو مبين بالشكل (3)، يتميز الطيفالترددى الخاص بهذا النوع من العيوب بظهور مطالات أعظمية متخامدة عند ترددات موافقة لمضاعفات التردد المميز لعيب الدحارج، أي عند 1BSF، وعند 2BSF، وهكذا...، بالإضافة لظهور توافقيات ترددها 1xFTF عند كل توافقية BSF، حيث:

$$BSF = \frac{P}{2B} * F * [1 - (\frac{B}{P} * \text{Cos}\theta)^2] \dots (4)$$



الشكل (3): الترددات المميزة لبعض الأعطال الشائعة بالرولمانات

## ii. أعطال الارتخاء: يمكن تمييز الحالات التالية:

- **خلوص كبير داخل الرولمان:** تتميز الاستجابة الترددية الخاصة بهذا النوع من العيوب بوجود مطالات أعظمية تردداتها من مضاعفات 0.5 RPM، وتقع ضمن المجال 2 to 10 RPM.
- **خلوص كبير بين الرولمان والمحور:** تتميز الاستجابة الترددية الخاصة بهذا النوع من العيوب بوجود مطالات أعظمية متعددة تردداتها متزامنة مع سرعة الدوران، وعادة ما ترتبط القمة الأعلى بينها بتردد قيمته 3 RPM.
- **خلوص زائد بين الرولمان والحاضن الخارجي:** تتميز الاستجابة الترددية الخاصة بهذا النوع من العيوب بوجود مطالات أعظمية متعددة تردداتها متزامنة مع سرعة الدوران، وعادة ما ترتبط القمتين الأعلىين بينها بتردد قيمتهما 1 RPM و 4 RPM.

## iii. الأعطال الكهربائية: كما هو الحال بالنسبة للأعطال أعلاه، يمكن الحصول على

معلومات مهمة عن طبيعة الأعطال الكهربائية من خلال دراسة منحنيات الاستجابة الترددية. بالعادة، تتسبب الأعطال الكهربائية بعدم انتظام بالقوى المتولدة

عن الحقل المغناطيسي المؤثرة على الجزء الدوار و/أو على الجزء الثابت [7]،  
وفيما يلي بعض المصطلحات اللازم معرفتها عند العمل على معالجة الاهتزازات  
المرتبطة بأعطال كهربائية:

- FL: تردد خط التغذية (50 or 60 Hz).

- NS: سرعة التزامن، بوحدة RPM، تحسب بالمعادلة التالية، حيث المتغير  
Poles No. مساوي لعدد أقطاب المحرك:

$$NS = (120 FL) / \text{Poles No.} \quad \dots(5)$$

- FS: تردد الانزلاق (Hz)، يحسب بالمعادلة التالية حيث:

$$FS = (Ns \times RPM) / 60 \quad \dots(6)$$

- PF: تردد عبور الأقطاب (Hz)، يحسب بالمعادلة التالية:

$$PF = \text{Poles No.} \times FS \quad \dots(7)$$

- RPF: تردد عبور قضبان الدوار، يحسب بالمعادلة التالية، حيث  
متغير Bars No. مساوي لعدد قضبان الدوار:

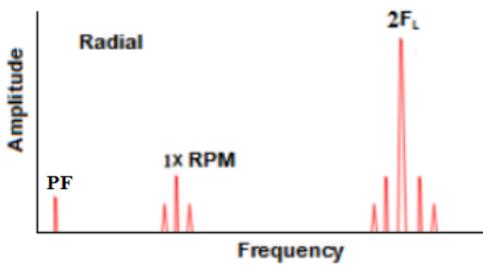
$$RPF = \text{Bars No.} \times NS \dots(8)$$

وفيما يلي عرض للأعطال الكهربائية الأساسية وللمركبات الترددية الدالة عليها ضمن  
طيف إشارة الاهتزاز:

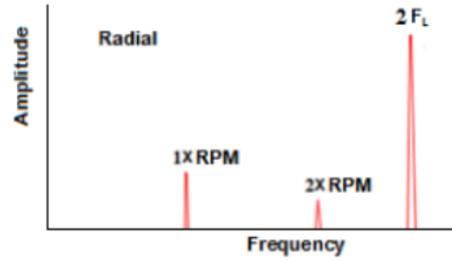
- **عطل الثابت:** كما هو مبين بالشكل (4/a)، يظهر هذا العطل على شكل مطالات أعظمية متعددة متخامدة تردداتها متزامنة مع سرعة الدوران، بالإضافة لمطال أعظمي إضافي بقيمة أكبر بشكل ملحوظ عند تردده مساوي لـ 2FL ضمن منحنى الاستجابة الطيفية لإشارة الاهتزاز.
- **دوار غير متمركز:** كما هو مبين بالشكل (4/b)، يظهر هذا العطل على شكل مطال أعظمي تردده مساوي لـ 2FL، مترافق مع مطالات جانبية أعظمية Sidebands تردداتها مزاحة عن التردد 2FL بقيم ثابتة مقدارها PF، أي عند ترددات مساوية لـ  $2FL \pm PF$  و  $2FL \pm 2PF$ ، ومطال أعظمية أخر عند 1RPM، مترافق مع مطالات جانبية أعظمية تردداتها مزاحة عن

التردد 1RPM بقيم ثابتة مقدارها PF، أي عند ترددات مساوية لـ  $1RPM \pm PF$ ، وأخيراً كمطال أعظمي ثالث عند PF.

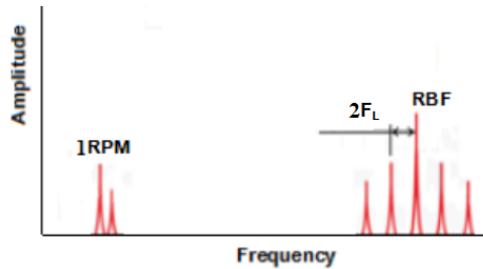
- أعطال تكسر القضبان: يتسبب الاضطراب الحاصل بالتيار المتدفق عبر قضبان الدوار الخاصة بمحرك تحريضي (والناتج عن التشقق أو التكسر) بتغير طيف الاهتزاز المرافق بحيث تظهر توافقيات جانبية للمطال الاعظمي الموافق لتردد عبور قضبان الدوار، علماً بأن ترددات تلك التوافقيات مساوية لـ  $RPF \pm 2FL$  و  $RPF \pm 4FL$ ، وفقاً لما هو مبين بالشكل (4/C).



(4/b) حالة دوار غير متمركز



(4/a) تعطل الجزء الثابت



(4/C) تكسر قضبان الدوار

الشكل (4): أطياف الاستجابات الترددية المميزة لحالات تعطل الثابت والدوار غير المتمركز وتكسر قضبان

4. التجهيزات المستعملة بتنفيذ البحث الحالي: ضمن سياق العمل بالبحث الحالي تم استعمال التجهيزات التالية:

أ. لاقط صوتي باستجابة ترددية منتظمة، ونمط عمل حقيقي غير اتجاهي، طراز ECM8000، من إنتاج الشركة الألمانية Behringer، ممانعته 600Ohms، وحساسيته -60dB، ومجال عملها الترددي من 15 إلى 20kHz.

ب. بطاقة تحصيل صوت مجهزة بما يلزم بوصلها مع حاسب شخصي، من إنتاج الشركة اليابانية Roland، طرازها UA-1010، واستجاباتها الترددية وفق التالي:

- عند تردد تحصيل 96 KHz : 20 Hz to 40 kHz (+0/-2 dB)
  - عند تردد تحصيل 48 KHz : 20 Hz to 22 kHz (+0/-2 dB)
  - عند تردد تحصيل 44.1 KHz : 20 Hz to 20 kHz (+0/-2 dB)
- ت. ثلاثة محركات كهربائية تحريضية ثلاثية الطور، متطابقة من حيث المواصفات، ومختلفة من حيث الحالات الفنية (الأول مستخدم لمدة 700 ساعة، والثاني مستخدم لمدة 18300 ساعة، والثالث مستخدم لمدة 19200 ساعة)، وللتمييز بينها أعطيت الرموز M1 و M2 و M3 بالترتيب. المواصفات الاسمية لكل منها وفق الآتي:
- الاستطاعة الاسمية للمحرك مساوية لـ 7.5 KW، وتيار تشغيله الأعظمي مساوي لـ 9.2A، وسرعة دورانه الاسمية مساوية لـ 1440 RPM.
  - عدد أقطاب المحرك مساوي لـ 4، وعدد قضبان دواره مساوي لـ 34، ونوع الرولمانات المدمجة بتركيبته هو SKF 6206.

ث. وحدة تحكم طراز 5442-25/570 DSV، من إنتاج الشركة الألمانية Dietz Electronic، للتحكم بسرعة دوران المحرك ضمن المجال من 0 وحتى 4000 RPM.

ج. حاسب محمول مجهز ببرمجيتي Matlab R2014a و Autosignal V1.7، علماً بأن البرمجية الثانية مجهزة بواجهة تخاطبيه تسمح بتنفيذ كافة أنواع المعالجات اللازمة للبحث، بالمجالين الزمني والترددي، ذلك من خلال أوامر جاهزة، متاحة ضمن قوائم منسدلة، وهذا ما يميزها عن البرمجية الأولى التي تستلزم العمل على وضع ترميز برمجية (كودات) لتنفيذ المعالجات المطلوبة.

## 5. أبحاث ودراسات مرجعية:

ضمن سياق العمل على تحديد الأعطال بالاعتماد على التحليل الطيفي لتسجيلات صوتية مأخوذة باستخدام هاتف محمول لرولماناتمحرك ذو استطاعة منخفضة قام الباحثان M. Oman و K.Krishnamoorthi بتطوير واستخدام تطبيق قائم على إخضاع الأمواج الصوتية المسجلة لتحويل هلدريت وطيف كورتسس Hilbert transform and Spectral kurtosis، ما مكن من تمييز الترددات المرتبطة بمطالاتأعظمية، ومن ثم تحديد الأعطال القائمة من خلال المقارنة بين تلك الترددات والترددات المرجعية الموافقة لحالات تعطل معروفة للرولمانات[9]. أكدت النتائج المستخلصة على أن إمكانية التنبؤ بأعطال الرولمانات من خلال تسجيل ومعالجة الأمواج الصوتية بالتطبيق المطور قائمة على الرغم من انعدام قدرة اللاقط الصوتي للهاتف المستخدم على تمييز الترددات التي تقل عن 200 Hz، على الرغم من أن المجال الترددي المميز لأعطال الرولمانات يقل عن تلك القيمة. أما الباحث F. Hemmati وزملاؤه[10] فقد عملوا على تطوير تقانة صيانة تنبؤية فعالة من حيث القدرة على التنبؤ بأعطال المحركات الكهربائية. التقانة المطورة قائمة على تسجيل الأمواج الصوتية الصادرة عن المحركات الكهربائية ونقلها للمجال الطيفي باستخدام التحويل المويجي، ذلك لأن المعالجات البديلة القائمة على تحويل فورييه السريع وتحويل فورييه قصير الأمد لم تكن كافية للوصول لنتائج إيجابية وفقاً للنتائج التي استخلصت من قبلهم. وفيما يتعلق بالباحث علي محمد وزملاؤه[11] فقد عملوا على تطوير خوارزمية صيانة تنبؤية قائمة على تسجيل الأمواج الصوتية الخاصة بضغط هواء ومعالجتها باستخدام التحويل المويجي المستمر، ذلك لان إمكانية الحصول على نتائج إيجابية لم تكن قائمة من خلال العمل بمرجعية تحويل فورييه السريع. وفيما يتعلق بالباحثان A. Glowacz و Z. Glowacz فقد عملا على تطوير تقانة تشخيص أعطال لمحركات التيار المستمر[12]. التقانة المطورة قامت على إخضاع المقاطع الصوتية الخاصة بمحركات معروفة الحالة الفنية (واحد سليم والباقي بحالات تعطل معروفة) لتحويل فورييه السريع، حيث استخلصا من نتائج ذلك التحويل أشعة السمات المستهدفة (Nearest neighbor و Nearest mean)، وباستخدام خوارزمية ذكاء صناعي محددة

حصلا على الأنماط المرجعية Template patterns الخاصة بالمحركات السليمة والمعطلة، وباستخدام تلك الأنماط تم تحديد حالات التعطل لمحركات إضافية غير معروفة الحالة الفنية بدقة %84. أما عمل الباحثان N.Saraswat و P.Sharma فقد كان مشابهاً لعمل الباحثين السابقين من حيث اعتماده على خوارزمية ذكاء صناعي (الشبكات العصبونية) للوصول للأنماط المرجعية وبالتالي استنتاج حالات التعطل، ومختلف عنه من حيث استخدامه للتحويل المويجي بدلاً من تحويل فورييه، ومن حيث التطبيق حيث أنه طبق على مراوح كهربائية بدلاً من محركات التيار المستمر [13]. أما الباحث Adam Glowacz فقد طبق التقنية المعروضة بالمرجع [12] (وفقاً لما عرض أعلاه) على أربعة محركات تحريضية ثلاثية الطور، الأول بحالة سليمة والثاني بتكسر قضيب دوار واحد والثالث بتكسر قضيب دوار والرابع بحلقة قفص سنجابي معطلة، ما مكنه من استنتاج الأنماط المرجعية الموافقة لتلك الحالات، ومن ثم استعمال النتائج للتنبؤ بأعطال محركات مدرجة ضمن برنامج صيانة تنبؤية [14]. أما الباحث باسل محمد سعيد وزملاؤه [15] فقد عملوا على كشف عطل تكسر قضبان الجزء الدوار للمحرك التحريضي. وضمن ذلك السياق حصلوا إشارات التيار والاهتزاز والصوت عند أحمال متعددة لمحرك سليم ولآخر ثلاثة من قضبانه مكسورة، وعالجوا تلك الإشارات بالمجالين الزمني والطيفي. السمات الزمنية التي استعملت هي متوسط الجذر التربيعي والقيمة الأعظمية لإشارة التيار وقيمة الذروة لإشارتي الاهتزاز والصوت. ولمعالجة النتائج بالمجال الطيفي استخدموا الطريقة التقليدية القائمة على حساب الترددات الاسمية الخاصة بعطل تكسر القضبان ومن ثم تحديد المطالات الموافقة لتلك الترددات بمنحنيات الاستجابة الترددية الناتجة عن تحليل فورييه السريع. بينت النتائج أن التنبؤ بعطل تكسر القضبان لم يكن ممكناً باستخدام السمات الزمنية، وكان ممكناً باستخدام المعالجة الترددية لإشارتي التيار وسرعة الاهتزاز الموافقة لحالة الحمل الكامل فقط، كما انه لم يكن ممكناً باستخدام المعالجة الترددية للأمواج الصوتية، وعزي السبب لضعف استجابة متحسسات الصوت المستخدمة.

ولمناقشة الأعمال أعلاه، يمكن أن توزع على صنفين، الأول قائم على التنبؤ بالأعطال من خلال تحديد الترددات الموافقة لمطالات أعظمية واضحة ومقارنة النتائج المستخلصة مع

الترددات المرجعية لحالات تعطل معروفة، الأبحاث [9,11,15]، حيث يشير كل تطابق لحالة تعطل محددة، أما الصنف الثاني فيعتمد على معالجة نتائج التحليل الطيفي باستخدام خوارزميات ذكاء صناعي، الأبحاث [10,12,13,14]، ما يُمكن من الحصول على أنماط مرجعية وبالتالي استنتاج حالات التعطل بمرجعية تلك الأنماط. ما يميز الصنف الثاني عن الأول أن الحاجة غير قائمة لا للبحث عن آلية معالجة تمكن من التمييز المنفرد للمطالات الأعظمية ضمن منحنى الاستجابة الترددية، ولا للمعرفة المسبقة بالترددات المرجعية الموافقة لكافة الأعطال المحتملة. وبالمقابل ما يميز الصنف الأول عن الثاني عدم حاجته لعدد كبير من الآلات المختبرة، وهو أمر مطلوب وضروري لضمان الحصول على نتائج موثوقة وشاملة عند العمل بأحد طرق الصنف الثاني، حيث الحاجة قائمة لما لا يقل عن آلة واحدة بوضع فني جيد وآلة واحدة تعاني من نوع عطل محدد، وبحيث يتم تغطية كل أنواع الأعطال الممكنة منفردة ومتقاطعة (للحصول على المعطيات اللازمة لاستنتاج كافة الأنماط المرجعية)، وهو أمر يستحيل تحقيقه بمعظم بيئات العمل الواقعية. ويغض النظر عن الاختلافات القائمة بين الصنفين أعلاه يمكن القول بأن نتائج الأبحاث أعلاه تفيد بان التنبؤ بالأعطال بمرجعية نتائج مستخلصة بتحويل فورييه السريع منفرداً غير ممكن نظراً لانعدام إمكانية تمييز المطالات الموافقة للترددات الاسمية للأعطال [15]، ولا بد من إتباع ذلك التحويل بمعالجات لفترة إضافية، وفق ما تم بالبحث [9]، أو النقل إلى المجال الطيفي باستخدام تقانة التحويل المويجي، وفق ما تم بالبحثين [10,11]، وإتباع تحويل فورييه بمعالجة إضافية باستخدام خوارزميات ذكاء صناعي، وفق ما تم بالبحثين [12,14]، وإتباع التحويل المويجي بذكاء صناعي، وفق ما تم بالبحث [13]، أو بالبحث عن خوارزمية تحويل بديلة قادرة على تمييز الترددات الموافقة لمطالات أعظمية دون الحاجة لمعالجات رياضية إضافية، وفقاً لما هو قائم بطريقة التناقص التدريجي المتعدد [16] Multitapering، والتي استعملت بالبحث الحالي، علماً بأنها لم تستخدم سابقاً بمجال التنبؤ بالأعطال، وفقاً لما أُتيح للباحث التأكد منه.

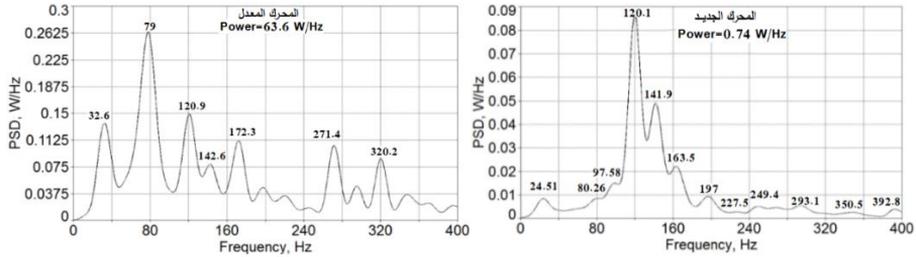
## 6. الأعمال المنجزة والنتائج المستخلصة:

## 1.6 تحديد الخوارزمية الأنسب للتنبؤ بالأعطال من خلال التحويل إلى المجال الطيفي:

وفقاً لما ذكر أعلاه، فإن المراجع العلمية المعنية بموضوع هذا البحث تشير إلى إمكانية تنفيذ عملية التحويل من المجال الزمني إلى المجال الطيفي من خلال مجموعة من الخوارزميات المعروفة، كما تشير أيضاً إلى ضرورة استخدام الخوارزمية الأنسب للتحويل وبما يتوافق مع طبيعة البيانات المطلوب معالجتها. ولتحديد الخوارزمية الأنسب للعمل الحالي ظهرت الحاجة لتحصيل معطيات صوتية لمحرك بعطل مفتعل ومن ثم معالجة معطيات ذلك المحرك باستخدام عدد من الخوارزميات ومحاولة التنبؤ بالعطل المفتعل من خلال النتائج المستخلصة، على أن يُقَر بالخوارزمية الأنسب من خلال تقييم مدى قدرتها على التنبؤ بالعطل المفتعل، وفقاً لآلية العمل المبينة بالخوارزمية المدرجة بالشكل (2). وضمن ذلك السياق، حصلت الأمواج الصوتية<sup>1</sup> الصادرة عن المحرك M1 بعد استقرار عمله على سرعة دوران مساوية لـ 1470RPM، ثم عدل أداء ذلك المحرك من خلال إحداث عيب أسطواني مصطنع، قطره 1.5mm وعمقه 0.4mm، على مسار المدرج الخارجي لآحد رولماناته، وحُصِلت الأمواج الصوتية الناتجة عن تشغيله عند نفس السرعة من جديد، علماً بأن الترددات المميزة للعطل المفتعل وتوافقياته الأساسية، محددة بمرجعية المعلومات المرجعية المدرجة بالفقرة (3)، مساوية لـ 87.6 و 175.2 و 262.8 و 350.4. ولتحديد خوارزمية التحويل الأنسب إلى المجال الطيفي، حُوِلت المعطيات المسجلة للمحرك M1 قبل وبعد التعديل إلى المجال الطيفي باستخدام الخوارزميات FSD و FMT و Wavelet وعُرِضت النتائج المستخلصة ككثافة طيف طاقي (Power Spectral Density (PSD)، وتبين الأشكال (5) و (6) و (7) ما تم الحصول عليه، أخذين بعين الاعتبار أن عمليات التحويل

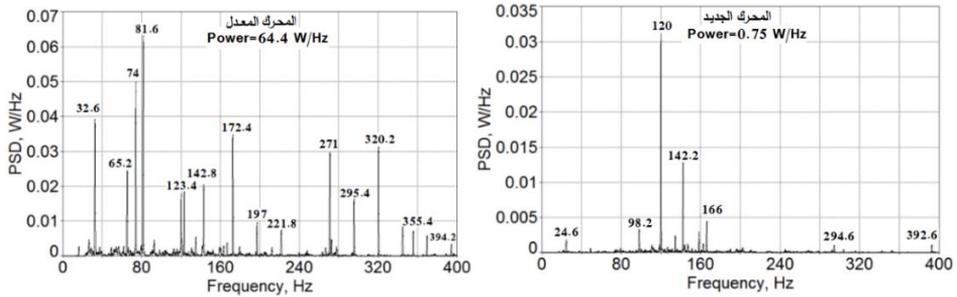
<sup>1</sup> باستخدام اللاقط الصوتي وبطاقة التحصيل التي وصلت مع الحاسب المستخدم، ما سمح بتحصيل البيانات الصوتية من خلال ترميز برمجيات Matlab، وما سمح بتحويل تلك البيانات لصيغة يمكن قراءتها ومعالجتها بالبرمجية Autosignal.

نفذت بالبرمجية Autosignal<sup>2</sup>، وأنه تم الاكتفاء بعرض النتائج المرتبطة بترددات لا تزيد عن 400 Hz، ذلك أن الترددات المميزة لأعطال الرولمانات لا تزيد عن تلك القيمة.



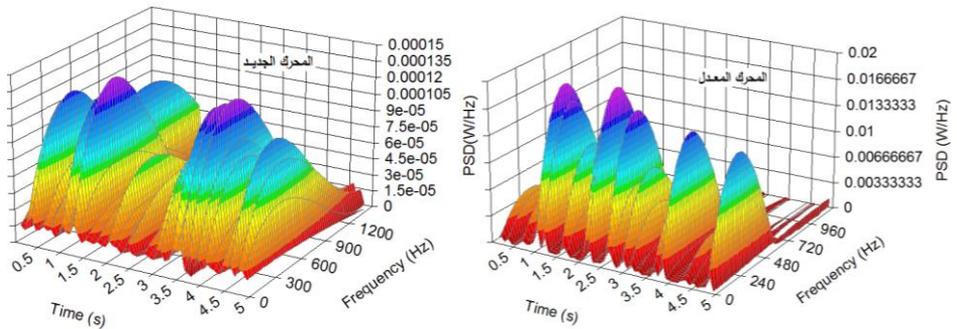
الشكل (5): منحنى الاستجابة الترددية لأمواف صوتية خاصة بالمحرك M1 قبل وبعد التعديل، مستنتجة

باستخدام تحويل الـFSD



الشكل (6): منحنى الاستجابة الترددية لأمواف صوتية خاصة بالمحرك M1 قبل وبعد التعديل، مستنتجة

باستخدام تحويل الـFMT



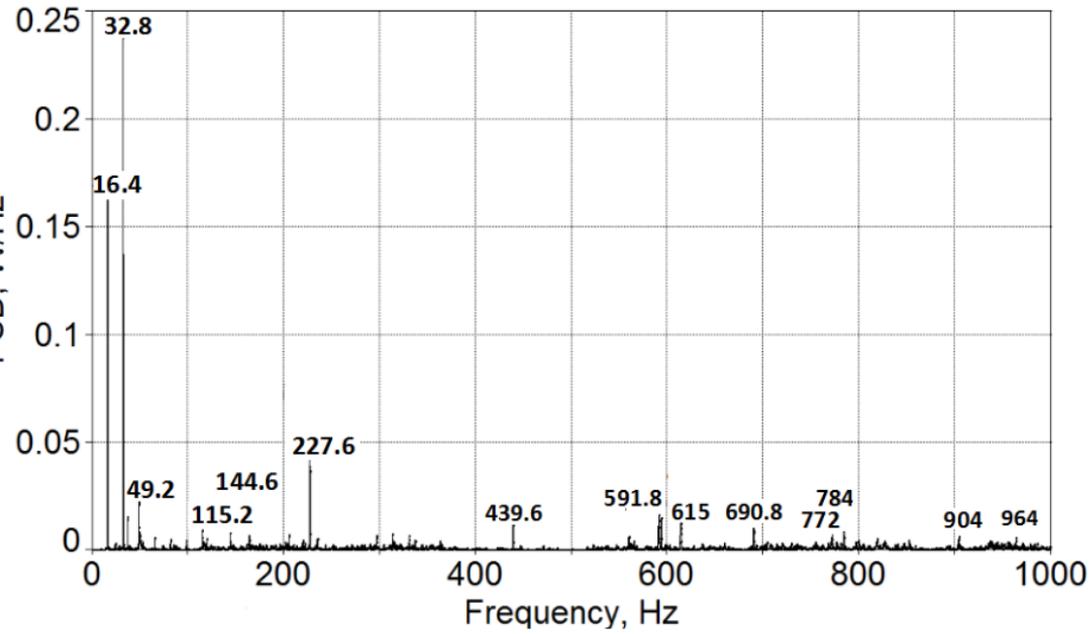
<sup>2</sup> التي تتيح إمكانية تنفيذ المعالجات المستهدفة دون الحاجة لوضع أي ترميز برمجي.

الشكل (7): منحني الاستجابة الترددية لأمواج صوتية خاصة بالمحرك M1 قبل وبعد التعديل، مستنتجة باستخدام تحويل Wavelet

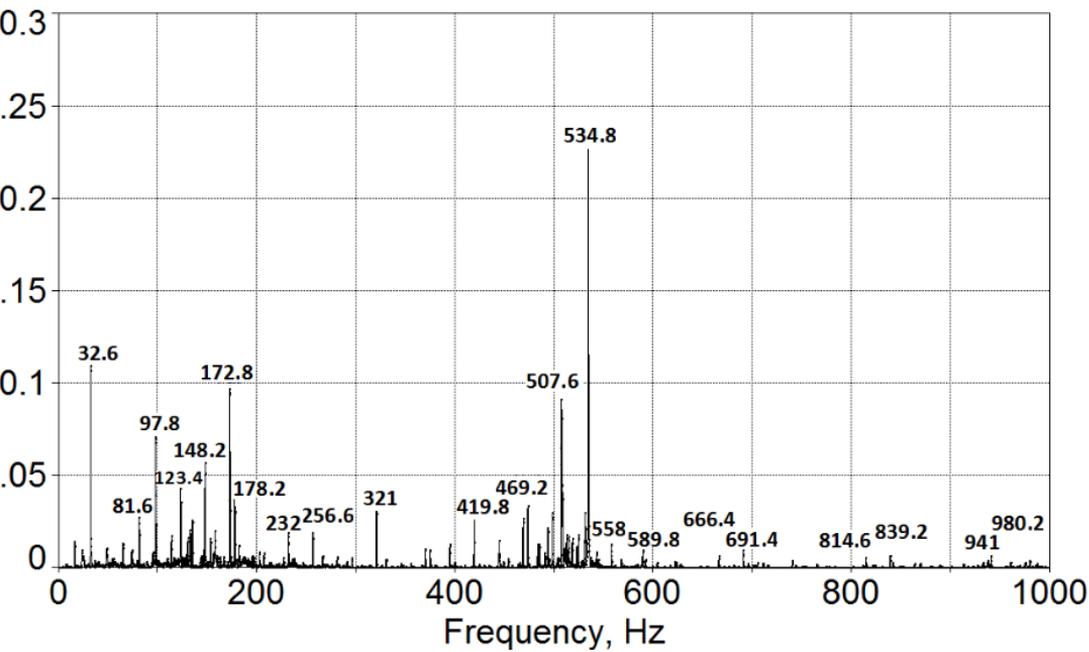
## 2.6 استعمال خوارزمية التحويل الأنسب للتنبؤ بأعطال المحركين M2 و M3:

ضمن سياق السعي للتنبؤ بأعطال المحركين M2 و M3، ذات الأوضاع الفنية غير المعروفة، والتي لم يسبق أن أُخضعت لبرنامج صيانة تنبؤية، عُمِلَ بمرجعية تسلسل مختلف قليلاً عن ما هو مدرج بالشكل (2)، حيث حُصِّلت نماذج من الأصوات الناتجة عن المحركين بوضعهما الفني القائم وهما مشغلين عند سرعات دوران مساوية لـ 1470 RPM، ثم حُوِّلت النماذج المُحصَّلة من الصيغة التماثلية إلى الصيغة الرقمية ومن ستيريو إلى أحادي وبعد ذلك مُرِّرت البيانات الناتجة على فلتر خاص بتخليصها من الضجيج، ومن ثم حُوِّلت إلى المجال الطيفي باستخدام خوارزمية الـ FMT<sup>3</sup>، (الخوارزمية الأنسب من حيث احتواء نتائجها على المعطيات اللازمة للتنبؤ بأعطال المحركات الكهربائية بنجاح، وفقاً لما أكدته النقاشات المدرجة بالفقرة السابقة من هذا البحث)، حيث عُرضت النتائج المستخلصة ككثافة طيف طاقي، وتبين الأشكال (8) و (9) ما تم الحصول عليه، أُخذين بعين الاعتبار الاكتفاء بعرض النتائج المرتبطة بترددات لا تزيد عن 1000 Hz، ذلك أن الترددات المميزة للأعطال الجاري تحديدها لا تزيد عن تلك القيمة، وفقاً لما تُوَكِّده المعطيات المدرجة بالجدول (1)، والتي حُسِبَت بمرجعية المعادلات والملاحظات الدليلية المدرجة بالفقرة (3) من هذه الورقة.

<sup>3</sup> باستخدام التعليمات المعنية ببرنامج Autosignal.



الشكل (8): منحنى الاستجابة الترددية لنموذج أمواج صوتية خاصة بالمحرك M2، مستنتجة باستخدام تحويل FMT



الشكل (9): منحنى الاستجابة الترددية لنموذج أمواج صوتية خاصة بالمحرك M3، مستنتجة باستخدام تحويل FMT

## 7. مناقشة النتائج:

### 1.7 مناقشة النتائج الخاصة بتحديد الخوارزمية الأنسب:

وفقاً لما ذُكر أعلاه فمعيار تحديد الخوارزمية الأنسب قائم على تقييم مدى احتواء نتائج التحويل بتلك الخوارزمية على مطالات أعظمية منفصلة عند ترددات إفرادية موافقة للأعطال القائمة. وبمرجعية ذلك المعيار يمكن تحديد خوارزمية التحويل الأنسب من بين الخوارزميات الثلاث المستعملة في البحث الحالي وذلك من خلال الرجوع للنتائج المدرجة بالأشكال (5) و (6) و (7)، والتي تؤكد على ما يلي:

أ. تؤكد منحنيات الاستجابة الترددية العائدة للمحرك غير المعدل، والمستنتجة باستخدام الخوارزميتين FSD و FMT، على أن سرعة الدوران الفعلية للمحرك تتراوح بين 1470 و 1476 RPM، وهو ما أُستنتج من قيم التردد 24.51 و 24.6 Hz الموافقين للمطالين الأعظميين الظاهرين في بداية المنحنيين المدرجين بالشكلين (5) و (6).

ب. منحنى الاستجابة المدرجين بالشكل (5)، والعائدين للمحرك M1 قبل وبعد التعديل، والمستنتجين باستعمال خوارزمية الـ FSD، مختلفين من حيث توزع مطالاتهما الأعظمية على المجال الترددي المأخوذ بالاعتبار، ومن حيث محتواهما الطاقى، حيث أن المحتوى الطاقى الخاص بالمحرك المعدل يزيد بحوالي 86 ضعف عن ذلك الخاص بالمحرك قبل التعديل، ما يشير إلى تراجع الحالة الفنية للمحرك M1 بنتيجة التعديل. وبالتالي فالتحويل بخوارزمية FSD أتاح إمكانية التنبؤ بتغير الحالة الفنية باتجاه الأسوأ، ولكنه لم يسمح بالتنبؤ بطبيعة العطل المفتعل الذي سبب ذلك التغير بمرجعية المعيار الذي أُعتمد بهذا البحث، ذلك لأن نتائجه لا تحتوي على مطالات أعظمية منفصلة عند الترددات الإفرادية المميزة للعطل المفتعل بالرولمان.

الجدول (1): قيم الترددات المميزة لأعطال نموذج المحركات المستعملة

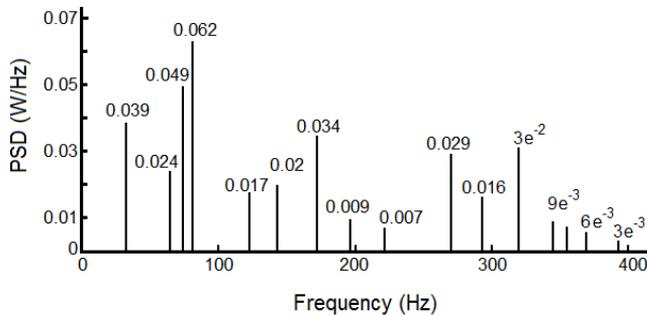
الترددات المميزة للأعطال (Hz)، محددة بمرجعية المعلومات المرجعية المدرجة بالفقرة (3)				أنواع الأعطال	
ملاحظات	التوافقيات الجانبية	التوافقيات الأساسية	التردد المحسوب		
التوافقيات الأساسية متخادمة المطالات	لا يوجد	262.8 و 175.2 و 350.4	87.6	المدرج الخارجي	أعطال الرولمانات
التوافقيات الأساسية متخادمة المطالات	±25 of 131.24 ±25 of	262.48 و 393.7	131.24	المدرج الداخلي	
التوافقيات الأساسية متخادمة المطالات	لا يوجد	40 و 30 و 20	10	القفص	
التوافقيات الأساسية متخادمة المطالات	±9.9 of 57.7 ±9.9 of 115.8	173.7 و 115.8	57.9	الدحارج	
-	لا يوجد	50 و 62.5 و 75 وهكذا حتى 250		داخل الرولمان	أعطال الارتخاء
المطال الأعظمي عند التردد 75 Hz	لا يوجد	25 و 50 و 75 و ... هكذا		بين الرولمان والمحور	
مطالين أعظميين عند التردد 25 و 100 Hz	لا يوجد	25 و 50 و 75 و ... هكذا		بين الرولمان والحاضن	
-	لا يوجد	لا يوجد	100	عطل الثابت	الأعطال الكهربائية
-	لا يوجد	لا يوجد	10	عطل عدم التمرکز	
	25 ±41.6	لا يوجد	25		
	100 ±41.6 100 ±83.2	لا يوجد	100		
-	850 ±100 850 ±200	لا يوجد	850	عطل تكسر القضبان	

ت. منحني الاستجابة المدرجين بالشكل (6)، والعائدين للمحرك M1 قبل وبعد التعديل، والمستنتجين باستعمال خوارزمية FMT، مختلفين من حيث توزع مطالتهما الأعظمية على المجال الترددي المأخوذ بالاعتبار، ومن حيث محتوَاهما الطاقوي، حيث أن المحتوى الطاقوي الخاص بالمحرك المعدل يزيد بحوالي 86 ضعف عن ذلك الخاص بالمحرك قبل التعديل، ما يشير إلى تراجع الحالة الفنية للمحرك M1 بنتيجة التعديل. ولبيان إمكانية التنبؤ بالعتل المفتعل من خلال التغيرات الحاصلة على المطالات الأعظمية قبل وبعد التعديل لا بد من طرح منحنى الاستجابة الترددية الخاص بالمحرك غير المعدل من المنحنى المكافئ العائد للمحرك المعدل، ويبين الشكل (10) المنحنى الناتج عن ذلك، أما المطالات الأعظمية الظاهرة بذلك المنحنى وتردداتها الموافقة فمدرجة بالجدول (2). وبمقارنة قيمة التردد المميز لعتل المدرج الخارجي للرولمان وتوافقياته الأساسية، أي الترددات 87.6 و175.2 و262.8 و350.4، وفقاً لما هو مبين بالجدول (1)، مع القيم الأقرب لها من تلك المدرجة بالجدول (2)، أي مع الترددات 81.6 و172.24 و271 و355.6، وبملاحظة أن التقارب القائم بينهما وبأن المطالات الموافقة للأخيرة متخامدة، وفقاً لما تؤكد المعطيات المدرجة بالجدول (2)، يمكن أن نؤكد على أن التحويل بخوارزمية FMT مكن من التنبؤ بالعتل المفتعل بالرولمان من جهة، ولكنه أكد على أن الظواهر الترددية المميزة لعتل المدرج الخارجي اعقد بكثير مما تحدده المراجع النظرية، ذلك أن:

- المطالات الأعظمية المتولدة نتيجة العتل المفتعل لا تقتصر فقط على تلك المحددة بالمراجع، بل تتعدى ذلك بكثير، حيث تظهر مطالات أعظمية كثيرة عند ترددات أخرى، وهذا راجع للاستجابات الترددية التي تبديها باقي عناصر المحرك عند انتشار وارتداد وتداخل أمواج الاهتزاز الناتجة عن الصدم العالي المتولد عن عتل الرولمان.

- قيم الترددات الحقيقية الموافقة للمطالات الأعظمية المميزة لعطل الرولمان لا يمكن أن تتطابق مع مكافئاتها النظرية لنفس السبب المذكور أعلاه، وهذا ما تؤكدته العديد من المراجع المختصة [7,17,20].
- المراجع التي قدمت نتائج تثبت تطابق الترددات الموافقة للمطالات الاعظمية المأخوذة من منحنيات الاستجابة الترددية مع الترددات النظرية المميزة للأعطال قامت على تجارب غير واقعية من حيث تنفيذها على تجهيزات اختبار بسيطة وبصورة لا تعكس السلوك الديناميكي الفعلي للتجهيزات الحقيقية [18].

ث. منحنيي الاستجابة المدرجين بالشكل (7)، والعائدين للمحرك M1 قبل وبعد التعديل، والمستنتجين باستعمال خوارزمية الـ Wavelet، مختلفين بشكل كبير من حيث محتواهما الطاقى، وقيمة المطال الأعظمى العائدة للمحرك المعدل تزيد بحوالي 235 ضعف عن القيمة المكافئة الخاصة بالمحرك قبل التعديل، ما يشير إلى تراجع الحالة الفنية للمحرك M1 بنتيجة التعديل. وبالتالي فالتحويل بخوارزمية Wavelet أتاح إمكانية التنبؤ بتغير الحالة الفنية باتجاه الأسوأ، ولكنه لم يسمح بالتنبؤ بطبيعة العطل المفتعل بمرجعية المعيار الذي أُعتمد بهذا البحث، ذلك لأن نتائجه لا تحتوي على مطالات أعظمية منفصلة عند الترددات الإفرادية المميزة للعطل المفتعل بالرولمان، علماً بأنه استُعمل لتحديد الأعطال بنجاح بالعديد من الأبحاث التي قامت على معايير مختلفة عن ذلك المعتمد بالبحث الحالي.



الشكل (10): المنحني الناتج عن طرح منحني الاستجابة العائد للمحرك غير المعدل من المنحني المكافئ العائد للمحرك المعدل

الجدول (2): المطالات الأعظمية الناتجة عن تعديل المحرك وتردداتها الموافقة

لها

الترددات الموافقة Hz	المطالات W/Hz	الرقم	الترددات الموافقة Hz	المطالات <sup>4</sup> W/Hz	الرقم
197	$9.5 \times 10^{-3}$	8	32.4	$3.9 \times 10^{-2}$	1
222	$7.3 \times 10^{-3}$	9	65.2	$2.4 \times 10^{-2}$	2
271	$3 \times 10^{-2}$	10	74	$4.9 \times 10^{-2}$	3
293.6	$9.1 \times 10^{-2}$	11	81.6	$6.3 \times 10^{-2}$	4
320.2	$3.1 \times 10^{-2}$	12	123	$1.7 \times 10^{-2}$	5
355.6	$7.2 \times 10^{-3}$	13	142.8	$2 \times 10^{-2}$	6
369.6	$5.9 \times 10^{-3}$	14	172.4	$3.5 \times 10^{-2}$	7

## 2.7 مناقشة نتائج التنبؤ بأعطال المحركين M2 و M3:

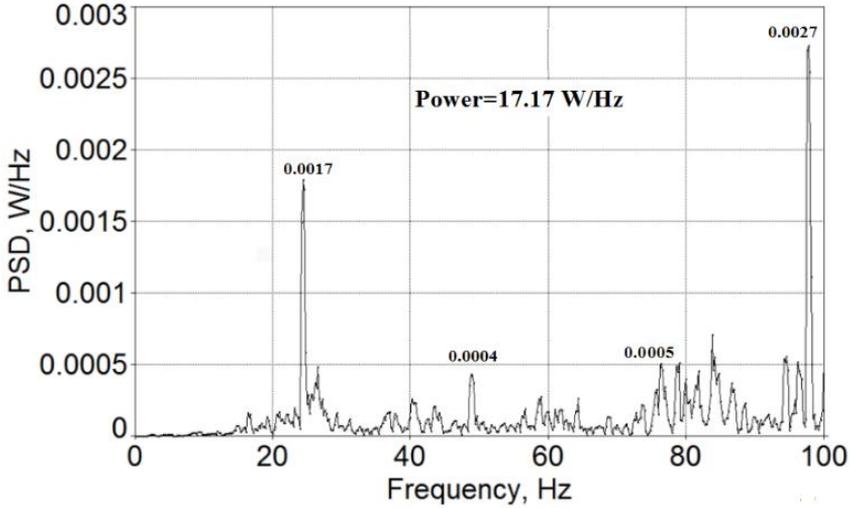
حيث أن كثافة المركبات الترددية المكوّنة للمنحنيين المدرجين بالشكلين (8) و (9) لا تسمح بالتنبؤ المباشر بأعطال المحركين M2 و M3 ظهرت الحاجة لتجزئة المجال الترددي الكلي الخاص بكلاً منهما إلى مجالات ترددية جزئية، وبحيث يُبحث ضمن كل منها عن المركبات الترددية النظرية المميزة لعيب منفرد ومحدد، وفقاً لما عمل عليه بالبحث [19]. وضمن ذلك السياق عُمِلَ على مجالات ترددية متعددة ما مكن من التنبؤ بالعيوب التالية التي حُدِدَت بمرجعية الترددات المميزة المعنية بها، والتوافقيات الأساسية الموافقة لها، وفقاً لما توكده النتائج المدرجة بالشكلين (11) و (12):

1. عطل الجزء الثابت بالمحرك M2، ذلك أن منحني الاستجابة الجزئي المعني الخاص بذلك المحرك، وفقاً لما هو مبين بالشكل (11)، يُظهر مطال أعظمي قيمته 0.0017 عند تردد قيمته مساوية لـ 1RPM، وتوافقيه أساسية مطالها 0.0004 عند تردد قيمته مساوية لـ 2RPM، كما يظهر أيضاً مطال أعظمي

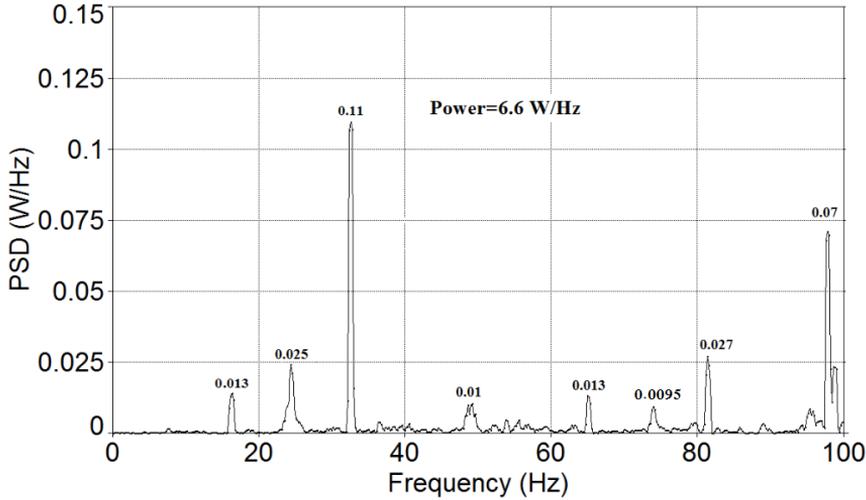
<sup>4</sup>مسلسلة من التردد الأقل إلى التردد الأعلى.

قيمته 0.0027 عند تردد قيمته مساوية لـ 2FL، وهذا ما يتطابق مع السمات المميزة لهذا النوع من الأعطال، وفقاً لما يؤكدده الشكل (4/a).

2. خلوص زائد بين الرولمان وحاضنه الخارجي بالمحرك M3، ذلك أن منحنى الاستجابة الجزئي المعني الخاص بذلك المحرك، وفقاً لما هو مبين بالشكل (12)، يُظهر مطال أعظمي قيمته 0.025 عند تردد قيمته مساوية لـ 1RPM، وتوافقية أساسية أولى مطالها 0.01 عند تردد قيمته مساوية لـ 2RPM، وثانية مطالها 0.0095 عند تردد قيمته مساوية لـ 3RPM، وثالثة مطالها 0.07 عند تردد قيمته مساوية لـ 4RPM، ويؤكد على أن المطالين الأعلىين بين المطالات الأربعة الملحوظة موافقين لترددات مساوية لـ 1RPM و 4RPM، وهذا ما يتطابق مع السمات المميزة لهذا النوع من الأعطال، وفقاً لما ذكر بالفقر (3) من هذه الورقة.



الشكل (11): منحنى الاستجابة الترددية الجزئي للأمواج صوتية خاصة بالمحرك M2، مستنتجة باستخدام تحويل FMT



الشكل (12): منحنى الاستجابة الترددية الجزئي لأمواف صوتية خاصة بالمحرك M3، مستنتجة باستخدام تحويل FMT

## 8. الخلاصة:

ضمن سياق البحث الحالي تم العمل بمرجعية تقانة صيانة تنبؤية قائمة على تسجيل نماذج من الأمواف الصوتية الصادرة عن الآلات، ومن ثم تحويل بيانات تلك الأمواف من المجال الزمني إلى المجال الترددي، وبحيث تقارن ترددات المطالات الأعظمية العائدة لمنحنيات الاستجابة الترددية الناتجة عن التحويل مع الترددات المرجعية المميزة لكافة الأعطال المحتملة، وبحيث تشير التطابقات المسجلة بالترددات لحالات تعطل محددة تماماً. المشكلة التي واجهت التطبيق الفعلي للتقانة المعمول بمرجعيتها تمثلت بعدم ملاحظة مطالات أعظمية منفردة وواضحة بمنحنيات الاستجابة الترددية المستنتجة من خلال التحويل ببعض خوارزميات التحويل شائعة الاستخدام، وبالتالي انعدام إمكانية التنبؤ بالأعطال. ولتجاوز هذه المشكلة عملاً لبحث الحالي على تطوير نهج قائمة على تجريب خوارزميات تحويل متعددة، وبحيث يتم التعامل مع الخوارزمية القادرة على إعطاء نتائج إيجابية من حيث القدرة على التنبؤ بالأعطال على أنها الأنسب لتنفيذ التحويل إلى المجال الترددي. وضمن ذلك السياق تم تجريب ثلاثة خوارزميات تحويل حيث تبين أن خوارزمية فوريبه متعددة التناقص Fourier Multi-Taper هي الأنسب، ذلك أن منحنيات

الاستجابة الترددية التي استنتجت باستخدامها مكنّت من التنبؤ بعطل مفتعل برولمان محرك كهربائي تحريضي. وللتأكد من القدرة على التنبؤ بأعطال محركات كهربائية تحريضية مجهولة الحالة الفنية، تم تطبيق النهج المقدم على نماذج أمواج صوتية عائدة لمحركين مجهولي الحالة الفنية، حيث تحققت إمكانية التنبؤ بالعديد من أعطالهما. وحيث أن تحويل فورييه متعددة التناقص لم يدرج ضمن أي نهج صيانة تنبؤية معروف، وفق ما أتيج للباحثين الاطلاع عليه، فيمكن القول بأن إدراجه ضمن النهج المقدم بهذا البحث يمثل مساهمة معرفية أصيلة بمجال الصيانة التنبؤية.

## 9. المراجع:

- [1] Hongxia Wang, Xiaohui Ye and Ming Yin, (2016), **Study on Predictive Maintenance Strategy**, International Journal of u- and e-Service, Science and Technology, Vol.9, No. 4, pp.295-300.
- [2] Chukwuekwe Douglas Okafor, (2016), **Condition Monitoring for Predictive Maintenance; a Tool for Systems Prognosis Within the Industrial Internet Application**, Master Thesis, Department of Production and Quality Engineering, Norwegian University of Science and Technology.
- [3] Syed Tafazzul Mahmood, (2011), **Use of Vibration Analysis Technique in Condition Based Maintenance**, Master Thesis, Department of Production Engineering, School of Industrial Engineering and Management, Royal Institute of Technology, Sweden.
- [4] Aleks Seppanen, (2016), **Utilizing Acoustic Measurements in Equipment Condition Monitoring**, Master Thesis, School of Science, Aalto University.
- [5] P. Henriquez, J. B. Alonso, M. A. Ferrer, C. M. Travieso and G. Gomez, (2012), **Fault Diagnosis using Audio and Vibration Signals in a Circulating Pump**, 25th International Congress on Condition Monitoring and Diagnostic Engineering.
- [6] Teemu Tossavainen, (2015), **Sound Based Fault Detection System; General Method for Fault Detection**, Master's Thesis, School of Science, Aalto University.
- [7] Json Maisy, **Spectrum Analysis the key Features of Analyzing Spectra**, SKF, Condition Monitoring Center, San Diego, California, 92123 USA

- [8]Kin Ming Kam,(2014),**Stationary and Nonstationary Time Series Prediction Using State Space Model and Pattern-Based Approach**, University of Texas at Arlington.
- [9]M. Oman, K. Krishnamoorthi,(2015),**Bearing Fault Detection with the Use of Acoustic Signals Recorded by a Hand-Held Mobile Phone**.
- [10]F. Hemmati, et al,(2016),**Roller Bearing Acoustic Signature Extraction by Wavelet Packet Transform, Application in Fault Detection and Size Estimation**, Applied Acoustic, Vol. 104, pp.101-118.
- [11]علي محمد عبد الشاهد، زبيدة سليم المنتصر، إبراهيم احمد بادي، (2019)،**التحويل المويجي المستمر في الكشف الآلي عن الأعطال**، جامعة مصراتة.
- [12]A. Glowacz and Z. Glowacz, (2017),**Recognition of Rotor Damage in a DC Motor Using Acoustic Signals**, Technical Science, Vol. 65, No. 2.
- [13]Pramod Sharma andNeelamSaraswat, (2015),**Diagnosis of Motor Fault Using Sound Signature Analysis**,International Journal of Innovative Research in Electrical,Electronics,Instrumentation and Control Engineering, Vol. 3, Issue 5.
- [14]Adam Glowacs,(2018),**Acoustic Based Fault Diagnosis of Three-Phase Induction Motor**, Applied Acoustic, Vol.137.
- [15]باسل محمد سعيد ، زبيدة سليم المنتصر، ياسر محمد يونس، محمد حامد سعود، (2011)،**كشف عطب تكسر قضبان الجزء الدوار للمحرك الحثي ثلاثي الطور**، جامعة الموصل.
- [16] AzadehMoghtaderi, (2009),**Multitaper Methods for Time-Frequency Spectrum Estimation and Unaliasing of Harmonic Frequencies**, Queen's University, Kingston, Ontario, Canada.
- [17] MilindNatu, (2013), **Bearing Fault Analysis Using Frequency Analysis andWavelet Analysis**, International Journal of Innovation, Management and Technology, Vol. 4, No. 1.
- [18] M. Saimurugan, R. Nithesh, (2016), **Intelligent Fault Diagnosis Model for Rotating Machinery Based on Fusion of Sound**

**Signals**, International Journal of Prognostics and Health Management, Vol. 018, ISSN 2153-2648.

[19] Galal A. Hassaan, (2014), **Frequency Spectrum Filtering for Machinery Fault Diagnostics**, International Journal of Scientific & Technology Research, Vol. 3, Issue 8.

[20] Vishal Jain, PravinSingru, (2015), **Development of Predictive Model for Vibro-acoustic Condition Monitoring of Lathe**, JVE International LTD Journal of vibroengineering, Volume 17, Issue 1, ISSN1392-8716



