

منهجية تحليل الإشارات الصوتية- الارتجاجية الصادرة عن المحركات البحرية

الدكتور معروف أحمد*
زياد فيصل شيخ محمد**

(تاريخ الإيداع 14 / 2 / 2008. قُبل للنشر في 27/3/2008)

□ الملخص □

يتناول هذا البحث مسألة قياس الإشارات الصوتية والارتجاجية الصادرة عن المحركات البحرية، حيث تمت الإشارة في البحث إلى أن حل مسائل التشخيص الارتجاجي لمحركات الديزل البحرية يتطلب إعداد نموذج مكافئ للآلة المدروسة، بحيث يمكن من خلال هذا النموذج تحديد العلاقة بين الخصائص التصميمية للمحرك (العقد المتحركة وقطع المحرك) وبين خصائص ومواصفات الإشارات الصوتية-الارتجاجية الصادرة عن المحرك، كما تم التأكد من أن العملية الاهتزازية الجارية في محركات الديزل تملك طبيعة محلية ثابتة، ولتقييمها يمكن اعتماد تابع الكثافة الطيفية للاستطاعة الموافق للحالة المستقرة. الطريقة المعتمدة في هذا البحث تعتمد على تحويل الإشارات الصوتية التشابهيية إلى إشارات رقمية ترددية استناداً إلى تحويلات سلاسل فورييه Fourier. في نهاية البحث تم عرض النتائج التجريبية لمعالجة الإشارات الصوتية الارتجاجية الصادرة عن بعض نماذج محركات الديزل البحرية.

الكلمات المفتاحية : المحركات البحرية، التشخيص الارتجاجي، الكثافة الطيفية للاستطاعة.

* أستاذ مساعد - كلية الهندسة الميكانيكية - أكاديمية الأسد للهندسة العسكرية - حلب - سورية.
** طالب دراسات عليا (ماجستير) - كلية الهندسة الميكانيكية - فرع الميكانيك البحري - أكاديمية الأسد للهندسة العسكرية - حلب - سورية.

A Processing Technique of Vibro-Acoustic signals for Marine Diesel Engines

Dr. Marouf Ahmaad*
Ziad F. Shaikh Mohammad**

(Received 14 / 2 / 2008. Accepted 27 / 3 / 2008)

□ ABSTRACT □

This study deals with the problem of vibro-acoustic measurement characteristic of marine diesel engines. It is noted that a solution to the problems of vibro-diagnosis of a diesel engine requires preparing an equivalent model of the machine under investigation in order to establish a relationship between the structural parameters of the engine (units or details of the engine) and the characteristics of vibro signals. It is concluded that vibrating processes in a diesel engine have a local, stationary property, whose evaluation can be made by using the function of spectral density of power in the static state. The technique used in this study is that of the transformation analog time vibro signals into frequency digital ones on the basis of algorithm of fast transformation. Finally, results of experiments and the technique of processing vibro-acoustic signals of diesel engines are submitted.

Keywords: marine diesel engines, vibro-diagnosis, spectral density of power (SDP).

*Associate Professor, Faculty of Mechanical Engineering, Al-Assad Academy For Military Engineering, Aleppo, Syria.

**Postgraduate Student, Department of Marine Mechanics, Faculty of Mechanical Engineering, Al-Assad Academy For Military Engineering, Aleppo, Syria.

مقدمة:

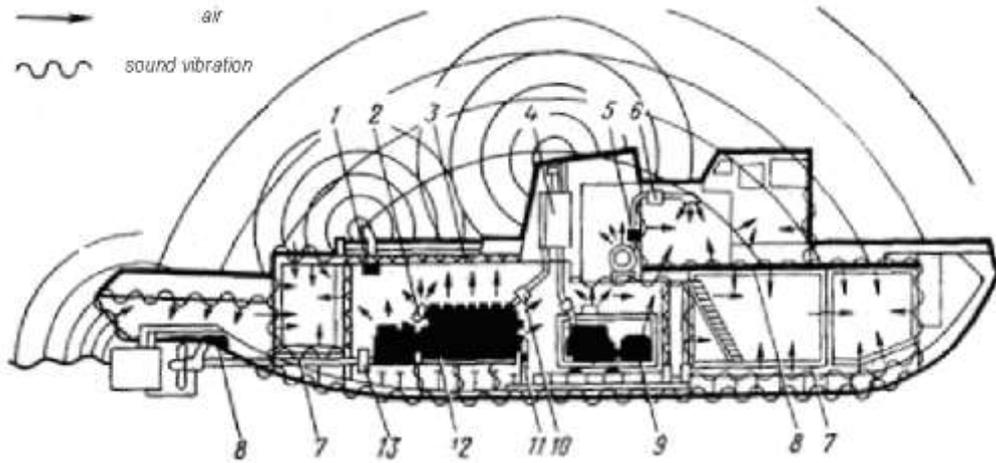
من المعلوم أن الخصائص الأساسية للارتجاج تتمثل بما يلي: انتقال الارتجاج، سرعة الارتجاج، تسارع الارتجاج. هذه الخصائص يمكن أن تُستخدم كبارامترات للتشخيص الفني. لتحديد قيم هذه الخصائص تُوجد مجموعة متنوعة من الطرق التي تستخدم أنواع مختلفة من الأجهزة والتجهيزات [1،2،3،4].

في الوقت الراهن يمكن تصنيف التشخيص الارتجاجي لمحركات الديزل استناداً إلى العوامل الأساسية التالية:

- حسب الخصائص المستخدمة في التشخيص الارتجاجي: الانتقال، السرعة، التسارع؛
- حسب طريقة قياس خصائص الارتجاج: بواسطة مُرسلات عضوية (داخل المحرك)، أو بواسطة مُرسلات محمولة على جسم المحرك، أو بواسطة مُرسلات متوضعة على مسافة محددة من المحرك؛
- حسب طيف التردد: طيف الترددات الصوتية، طيف الترددات فوق الصوتية؛
- حسب طريقة معالجة إشارات الارتجاج: معالجة تشابهية، معالجة رقمية؛
- حسب مستوى التشخيص: تشخيص الأجهزة والآلات، تشخيص بعض قطع الأجهزة والآلات.

إن أهم ما يميز طرق التشخيص الارتجاجي لمحركات الديزل هو استخدام البارامترات الديناميكية التي تظهر نتيجة التأثير المتبادل بين قطع المحرك أثناء العمل. الاهتزازات المرنة التي تحدث أثناء ذلك تنتشر داخل قطع المحرك وفي الوسط الخارجي، حيث يتم التقاطها وتسجيلها على شكل بارامترات: انتقال، سرعة، تسارع. لتحليل طيف هذه البارامترات يجب أن نعرف أسباب الارتجاج في الآلات والدارات، وكذلك مجالات التردد للمستويات العليا من الضجيج.

إن ارتجاج الآلات والمعدات التي تتكون منها محطة القدرة على السفينة يمكن تقسيمها من حيث المنشأ إلى عدة أنواع: ميكانيكية، هوائية، هيدروديناميكية وكهرومغناطيسية. المصادر الأساسية للارتجاج في محطات القدرة البحرية وطرق انتشار الارتجاج والضجيج على متن السفينة موضحة على الشكل (1).



الشكل (1) المصادر الأساسية للارتجاج في محطات القدرة البحرية وطرق انتشاره

أثناء التأثير المتبادل تظهر الخصائص المختلفة لقطع المحرك والتبدلات التي تطرأ على هذه القطع خلال عمل المحرك. لذلك فإن الإشارات الارتجاجية (التي تُعتبر نتيجة مباشرة للتأثير المتبادل بين قطع المحرك) تُشكل حاملاً صادقاً للمعلومات التي تُعبر عن الحالة الفنية لقطع المحرك التي تُشكل بين بعضها البعض مزدوجات حركية.

أهمية البحث وأهدافه:

من أهم المواضيع التي يجب معالجتها أثناء حل المسائل المتعلقة بالتشخيص الارتجاجي لمحركات الديزل هي إعداد النموذج (الموديل) المكافئ للآلة وتحديد العلاقة بين البارامترات التصميمية للمحرك (العقد المتحركة و قطع المحرك) وبين خصائص ومواصفات الإشارات الصوتية-الارتجاجية الصادرة عن هذه العقد والقطع أثناء عمل المحرك، والتي يمكن أن تحمل المعلومات التشخيصية المطلوبة لتحديد الحالة الفنية للمحرك.

تتركز الصعوبات المتعلقة بالبارامترات التصميمية أثناء إعداد الموديل التشخيصي لمحركات الديزل البحرية بما

يلي:

1. التنوع الكبير للأسطح المهتزة التي تملك شروط تثبيت مختلفة؛
 2. العدد الكبير لمنابع الارتجاج؛
 3. قيم وأشكال العوامل المرخصة للارتجاج؛
 4. تعدد طرق وأشكال الأمواج للاهتزازات المرنة المنتشرة في مختلف عناصر الآلة.
- أثناء إعداد الموديل التشخيصي لمحركات الديزل البحرية يجب حل المسألتين الرئيسيتين التاليين:
- ماهي عقد محرك الديزل الخاضعة للتشخيص؟
 - ما هي البارامترات الأكثر تعبيراً وتوصيفاً للحالة الفنية لهذه العقد؟
- المنابع الأساسية للارتجاج (المزدوجات الحركية) في محرك الديزل مرتبة تنازلياً (بالنسبة لما تصدره من ارتجاج) تكون على الشكل التالي: مجموعات الاسطوانات والمكابس، جهاز الوقود [5،6،7].
- في البحث تم تناول مسألة تشخيص أحد أهم القطع الأساسية في جهاز الوقود لمحركات الديزل البحرية وهو بخاخ الوقود.

القاعدة الفيزيائية لتقييم الظواهر الصوتية-الارتجاجية التي تحدث أثناء عمل بخاخات الوقود تُحدد بالعاملين الرئيسيين التاليين: التأثير الطرقي (الصدمي) للإبرة أثناء الصعود والهبوط، والظواهر الهيدروديناميكية أثناء عملية ضخ الوقود.

تتعلق العمليات الاهتزازية في البخاخ الناجمة عن التأثير الطرقي للإبرة بقوة شد نوابض الإرجاع التي تتغير أثناء عملية استئثار محرك الديزل، لذلك فإن قوة الشد المسبق لنوابض الإرجاع يمكن أن تُستخدم كبارامتر تصميمي، يُحدد مستوى معايرة وضبط أجهزة الوقود.

هناك مصدر آخر لتحريض الاهتزازات في تيار الوقود يتمثل في التغيرات الدورية للضغط المرتبطة بانفصال الدوامات في تيار الوقود من فتحات التدوير في رؤوس البخاخات. تردد انفصال الدوامات يمكن أن يشغل طيفاً واسعاً جداً [8].

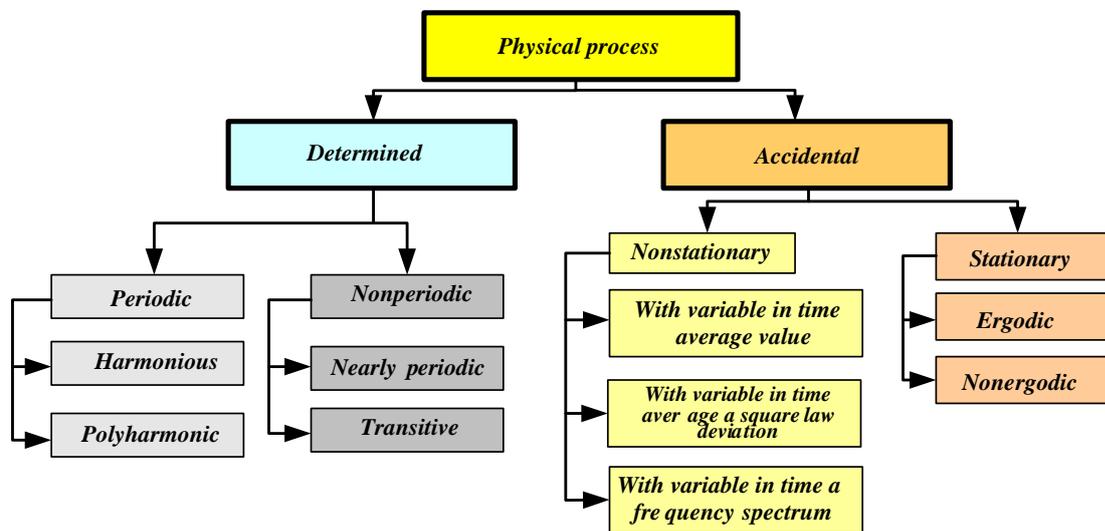
إن أحد أهم مصادر الاهتزازات لجسم البخاخ هي العمليات الهيدروديناميكية التي تجري بسبب نقل وضخ الوقود وتذير الوقود، وهذه الاهتزازات تملك طيفاً واسعاً لمطالات الضغط والسرعة. لقد أثبتت التجارب أن العوامل

الهامة ضمن هذا السياق هي تغيرات طيف اهتزازات البخاخات ضمن المجال [kHz] 18 ÷ 12 أثناء تغير كمية الوقود المحقونة خلال شوط عمل واحد للمحرك.

كما هو معلوم فإن أية معطيات تجريبية يتم الحصول عليها من خلال رصد ظاهرة فيزيائية حقيقية يمكن تصنيفها إلى أحد النمطين التاليين: معطيات مؤكدة أو معطيات عشوائية (الشكل 2).

أثناء عمل محرك الديزل تحدث (وبشكل مؤكد) ظواهر تؤثر على الارتجاج بشكل عشوائي مطلق (تغيرات الشروط الخارجية، خلل في عمل دارة الوقود أو الزيت أو التبريد، بما في ذلك العامل البشري). لذلك فإن ارتجاج محرك الديزل يعتبر حدثاً عشوائياً [9،10].

تقسم الحوادث العشوائية كما يتضح من الشكل (2) إلى: حوادث مستقرة وحوادث غير مستقرة. إن الحوادث غير المستقرة هي تلك الحوادث التي لا تلبى متطلبات خاصية الاستقرار.



الشكل (2) تصنيف الظواهر الفيزيائية

إن ارتجاجات محركات الديزل البحرية خلال فترة زمنية طويلة تمتد حتى تبديل المكابس ذات طبيعة غير مستقرة. إلا أن تقييم هذه الارتجاجات يجرى عادةً من خلال دراسة أدوار الحلقات الكينماتيكية ذات الفترات الزمنية القصيرة (تقاس بالثواني)، أي من خلال أدوار ذات طبيعة محلية مستقرة، لذلك تتم معالجة المعطيات باستخدام طرق تحليل مواصفات الظواهر العشوائية المستقرة.

بما أنه لا يمكن توصيف الظواهر العشوائية المستقرة من خلال نموذج رياضي واضح، فإنه لتقييم هذه الظواهر يجب استخدام طرق تقييم الخصائص الإحصائية لهذه الظواهر. تقييم المعطيات أثناء ذلك يجب أن يتم في مجال الزمن وفي مجال التردد أيضاً. الخاصة الأساسية الخاضعة للتقييم في هذه الحالة هي التابع $P_{xx}(f)$ والذي يسمى عادةً: الكثافة الطيفية لاستطاعة الارتجاج (Spectral density of power - SDP) ذات الطبيعة المستقرة، لذلك ستم متابعة الدراسة استناداً إلى تقييم بارامترات تابع SDP، والتي تتمثل في قيم الترددات الموافقة للقيم الأعظمية (قيم الذروة) لهذا التابع، بالإضافة إلى قيم SDP عند ترددات الذروة.

يمكن استخدام تابع الكثافة الطيفية للاستطاعة SDP لتحديد العلاقات التي تُوصف التغيرات التي تحصل في البارامترات التصميمية لعقد وقطع محركات الديزل. هذا يعني أنه يمكن استخدام SDP كبارامتر تشخيصي أثناء دراسة ارتجاجات محركات الديزل بما في ذلك كافة أقسام وأجهزة هذه المحركات. في هذا البحث تمت دراسة ارتجاجات أحد أهم أجزاء جهاز الوقود وهو البخاخات [11].

بذلك تتلخص أهداف هذا البحث بما يلي:

- إعداد منهجية معالجة الإشارات الصوتية-الارتجاجية الصادرة عن عقد وقطع محركات الديزل البحرية.
- تنفيذ اختبار تجريبي لهذه المنهجية على محرك ديزل بحري والحصول على النموذج الرياضي المكافئ للتابع المنشود، وهو تابع الكثافة الطيفية للإشارات الصوتية-الارتجاجية الصادرة عن بخاخات الوقود وتحديد عوامل التأثير على مجال الترددات المختار.

طرائق البحث ومواده:

تعتمد الدراسات المنفذة في هذا البحث على المبادئ الأساسية لنظرية الاحتمالات والإحصاء الرياضي ونظرية الحوادث العشوائية. المنهجية المقترحة في البحث تعتمد على طريقة قياس وتحليل بارامترات الحوادث العشوائية بما في ذلك جمع وتحليل القياسات التجريبية والمعالجة الإحصائية لهذه النتائج باستخدام التحليل الترابطي والتحليل الإرجاعي.

النتائج والمناقشة:

المعلومات التشخيصية التي تكون على شكل إشارة تشابهية مستمرة يجب أن يتم تحويلها إلى شكل رقمي. لهذا الغرض تُستخدم محولات تشابهية-رقمية (Analog-Digital Converter - ADC). لكن قبل تحويل الإشارة الصوتية-الارتجاجية من تشابهية إلى رقمية يجب تحضير وإعداد كافة المعطيات اللازمة لذلك بشكل جيد. أثناء تحويل الإشارة التشابهية إلى شكل متقطع لتحليلها عددياً يجب اختيار قيمة مجال التقطيع الزمني Δt بشكل صحيح. كما يجب تحديد الحد الأدنى للتقطيعات اللازمة لتوصيف الطول المعتمد T_R [s] عند قيمة محددة للعرض B [Hz].

$$N = 2B \cdot T_R \quad (1)$$

لذلك وعند اعتماد خطوة زمنية ثابتة تُحدد القيمة العظمى لمجال التقطيع الزمني بالعلاقة:

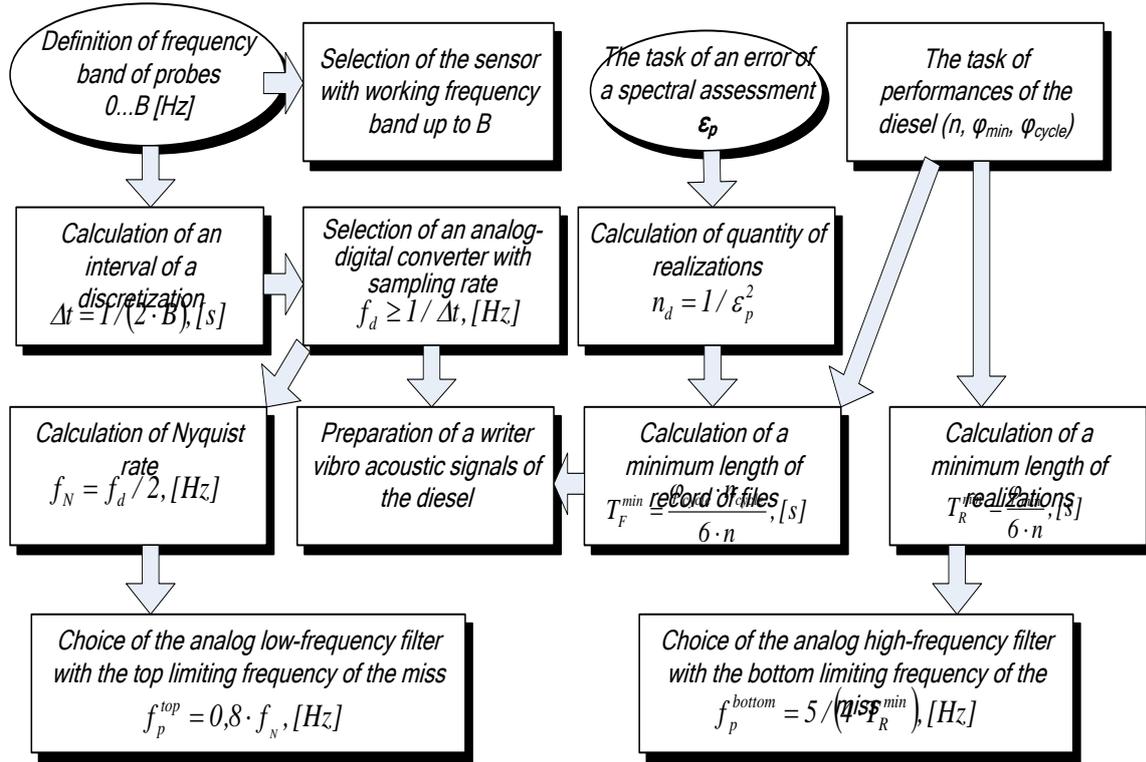
$$\Delta t = 1/(2B) \quad (2)$$

لضمان أن كل تقطيع للإشارة تشمل كافة الترددات الموجودة في الإشارة الابتدائية المستمرة، فإن كل حلقة للاهتزازات المتوافقة يجب أن تتكرر مرتين على الأقل. لذلك فإن التردد الأصغري (تردد Nyquist) الذي يمكن أن يظهر عند التقطيع بسرعة $1/\Delta t$ يساوي:

$$f_N = 1/(2\Delta t) \quad (3)$$

الترددات الكبرى الموجودة في الإشارة الابتدائية ستكون موجودة ضمن المجال $0, \dots, 1/(2\Delta t)$ [Hz] وستكون غير مختلفة عن الترددات الصغرى الموجودة ضمن هذا المجال. الطريقة الوحيدة لحل هذه المشكلة تتلخص في جعل الترددات الموجودة في الإشارة التشابهية الابتدائية الداخلة إلى المحول التشابهي الرقمي (ADC) أكبر من تردد

Nyquist (أصغر تردد قابل للإظهار). لهذا الغرض يجب وضع مرشح تشابهي للترددات المنخفضة قبل (ADC).
 قيمة تردد الترشيح (الفترة) تتراوح ضمن المجال $f_p^{top} = (0,7 \div 0,8) f_N [Hz]$.
 يجب أن نأخذ بعين الاعتبار أن طول النقطيعة $T_R [s]$ يجب أن يكون أكبر بكثير من دور أصغر مركبة موجودة ضمن الإشارة المدروسة. إن تحقيق هذا الشرط ضروري من أجل فرز الاهتزازات ذات الترددات المنخفضة. لذلك يجب أن نضع مرشحاً (فاتر) تشابهيّاً للترددات المرتفعة ذا تردد حدي أصغري للتمرير $f_p^{bottom} = 5 / (4T_R^{min}) [Hz]$.
 المخطط النهجي- المنطقي لتحضير المعطيات التشخيصية الارتجاجية بهدف تحويلها إلى الشكل الرقمي موضحة على الشكل (3).



الشكل (3) المخطط النهجي- المنطقي لتحضير المعطيات التشخيصية الارتجاجية بهدف تحويلها إلى الشكل الرقمي

طريقة معالجة الإشارات الصوتية-الارتجاجية:

الطرق الرقمية الحديثة للتحليل الطيفي تعتمد على استخدام سلاسل العينات المتتالية لإشارة الارتجاج مع تحويلها إلى الصيغة الرقمية ومعالجتها اللاحقة باستخدام الحواسيب الالكترونية. إن تحويلات فورييه Fourier تُعتبر القاعدة الرياضية التي تربط الإشارة الزمنية (أو موديل هذه الإشارة) مع إظهارها ضمن المجال الترددي. تُستخدم هذه التحويلات تقريباً لكافة صنوف الإشارات التي تملك خاصية الاستقرار. في هذا النوع من الإشارات يمكن استخدام خوارزمية التحويلات السريعة لفورييه

(Algorithm of fast transformation Fourier)

الفكرة الأساسية لخوارزمية تحويلات فورييه السريعة تتلخص في تقسيم السلسلة النقطية الزمنية لفورييه ذات الرقم N (discrete time number Fourier - DTNF) على اثنتين من السلاسل DTNF أصغر منها قيمةً، بحيث يمكن حساب كلٍ منهما بشكلٍ مستقل، وبعد ذلك يتم جمعهما خطياً مع بقية السلاسل بحيث يتم في النهاية الحصول على DTNF تكافئ التتالي النقطة الابتدائي ذا الرقم N . هذه السلسلة DTNF التي تم الحصول عليها ذات الحجم الأقل يمكن تحويلها من جديد إلى سلسلة DTNF ذات حجم أقل وهكذا.

أثناء الحصول على الكثافة الطيفية لاستطاعة الارتجاج بالنسبة للمتتاليات الزمنية المتقطعة (مثل الإشارات الارتجاجية في الصيغة الرقمية) يجب أن نحصل في نهاية المطاف على تقييمات طيفية إحصائية مستقرة ذات سماحية أعظمية.

لهذا الغرض يجب أن يتم اختيار توابع الثغرات لتقييم معطيات التوابع الترابطية وبارامترات التوسيط في المجالات الزمنية والترددية التي تستطيع أن تحقق التوازن بين متطلبات تخفيض مستوى المطالات الأعظمية الجانبية وتحقيق التوسيط الفعال بالنسبة لجميع المطالات الذي يؤمن السماحية الطيفية الملائمة.

يمكن الحصول على نتائج مستقرة ودقة جيدة (ذات انحرافات صغيرة للتقيم الطيفية الحقيقية على كامل طيف الترددات) فقط عندما يتحقق الشرط التالي:

$$T \cdot B_e \gg 1 \quad (4)$$

حيث:

T - كامل المجال الزمني الذي تُدون خلاله المعطيات [s]؛

B_e - العرض المكافئ للشريحة [Hz].

في هذه الحالة سيتحقق لكافة التقييمات الطيفية مايلي:

$$Q \cdot T \cdot B_s \approx 1 \quad (5)$$

حيث:

B_s - العرض المكافئ الإحصائي لشريحة الثغرة الزمنية التي تُحدد بالنسبة للنافذة الطيفية $\Omega(f)$ بالعلاقة:

$$B = \frac{\left[\int_{-1/2T}^{1/2T} \Omega(f) df \right]^2}{\int_{-1/2T}^{1/2T} \Omega^2(f) df} \quad (6)$$

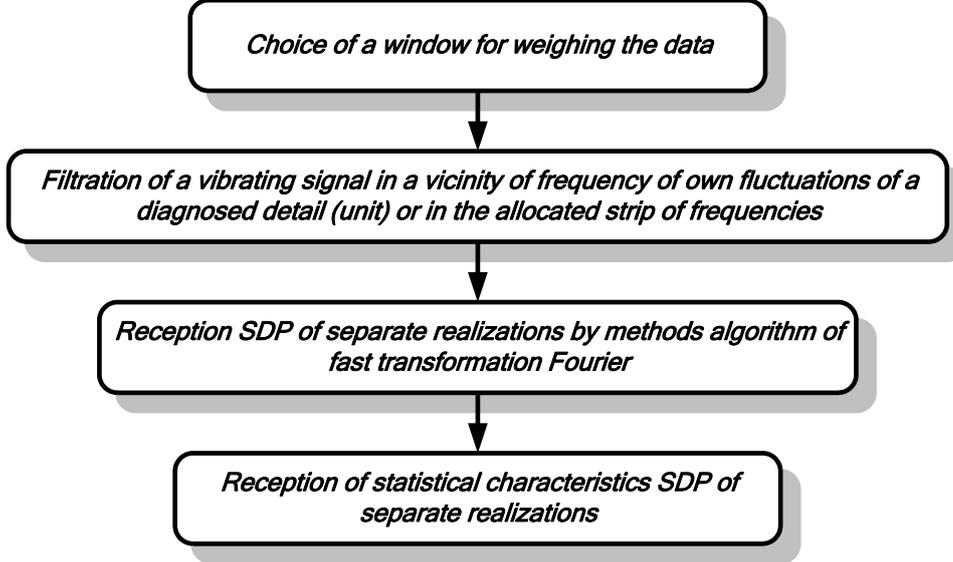
حيث:

Q - المعيار الإحصائي لجودة التقييم والذي يُحدد كنسبة بين تشتت تقييم SDP ومربع التوقع الرياضي لهذا

التقييم.

$$Q = \frac{S\{(f)\}}{[M\{\bar{P}(f)\}]^p} \quad (7)$$

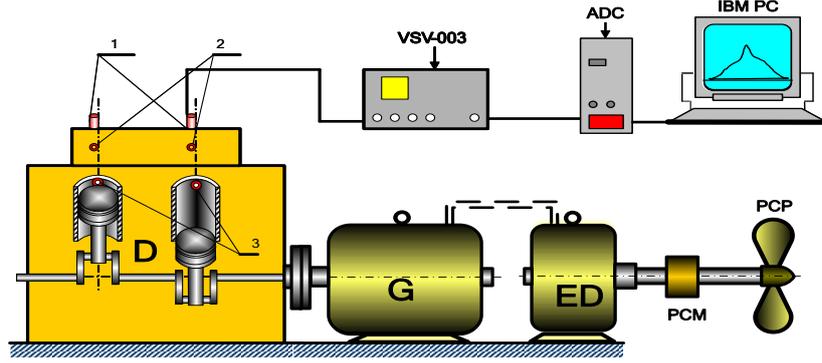
المخطط النهجي المنطقي لمعالجة الإشارات الارتجاجية موضح على الشكل (4)



الشكل (4) المخطط النهجي المنطقي لمعالجة الإشارات الارتجاجية

بذلك وتعميماً لما تم توضيحه سابقاً يمكن أن نستنتج ما يلي:

- بهدف تحقيق أكبر قدرة تمييز بالتردد ومع الأخذ بعين الاعتبار للطبيعة الدورية لعمل محرك الديزل، فإن طول التقطيع يجب ألا يقل عن دورة عمل كاملة لمحرك الديزل. عرض الثغرة أيضاً يجب أن يساوي هذه القيمة، وبالتالي لتأمين الاستقرار في التقييم الطيفي يجب أن تبقى قيمة تردد عمل محرك الديزل على كافة مراحل التشخيص ثابتة.
 - قدرة التمييز بالتردد مع المحافظة على شروط التشخيص، تزداد بانخفاض التردد الأعظمي لدوران محرك الديزل.
 - لتخفيض قيمة الخطأ المعياري يجب أن نقوم بتدوين المعطيات عن الإشارات الصوتية_الارتجاجية لمحرك الديزل على امتداد عدد كبير من الدورات العاملة، وذلك بهدف التمكن من إعداد البرنامج المناسب للحصول على الحجم المطلوب من المعطيات عن هذه الإشارات.
- متابعة إعداد المنهجية المطلوبة في هذا البحث تم تنفيذها مع الأخذ بعين الاعتبار للبارامترات التصميمية التشخيصية. لذلك وبهدف إظهار البارامترات الأكثر دلالة على المعطيات التشخيصية تمت معالجة كمية كبيرة من المعطيات التجريبية التي تم جمعها أثناء تنفيذ التجارب المخبرية المخصصة لتشخيص الحالة الفنية لباخين في محرك ثنائي الاسطوانات رباعي الأشواط، قطر اسطوانته $D=85$ [mm]، وطول شوطه $S=110$ [mm]. مخطط التجربة موضح على الشكل (5).



الشكل (5) مخطط تجربة الحصول على المعطيات التشخيصية لبخاخات محرك الديزل

حيث أن:

- D- محرك ديزل
G - منوبة كهربائية PN-85
ED- محرك كهربائي
VSV-003- مضخم الإشارات الصوتية
PCP- رفاص متغير الخطوة PCM - آلية تغيير
خطوة
1- حساسات بيزومترية
2 و 3 - مرسلات المركبات الأفقية للارتجاج على غطاء الاسطوانة وعلى كتلة الاسطوانات في منطقة النقطة الميتة العليا TPC.

تضمنت التجربة قياس وتدوين إشارات التسارع الارتجاجي في أنبوب وقود الضغط العالي على أنظمة العمل المختلفة لمحرك الديزل وأثناء الحالات الفنية المختلفة لبخاخات الوقود.

محرك الديزل يعمل على منوبة كهربائية PN-85. حمولة محرك الديزل تم تأمينها بواسطة محرك كهربائي يقوم بتدوير رفاص متغير الخطوة PCP وقد تم تغيير هذه الحمولة بواسطة آلية تغيير خطوة الرفاص.

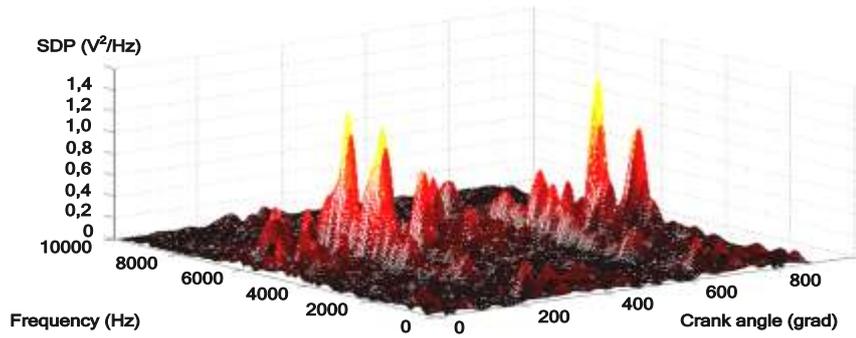
العوامل المؤثرة على بارامتر الخرج والتي تمت دراستها أثناء التجارب هي:

1. ضغط تدوير الوقود (p_{fuel})؛
2. حمولة المحرك (P_e)؛
3. زاوية تسبيق حقن الوقود (ϕ_{afd}) (advance of fuel delivery).

وُضع لدى تنفيذ البحث برنامج حاسوبي بلغة MATLAB 6.5 لمعالجة الإشارات الارتجاجية وحساب SDP،

وسُمي Spectr 1 .

يقوم هذا البرنامج بمعالجة الإشارات الارتجاجية المدونة في ذاكرة المعطيات الأولية الحاسوبية بشكل رقمي ومن ثم عرض هذه النتائج بشكل مرئي. في هذا البرنامج تم اعتماد طريقة الجيب المضخم في التقطيع الزمني أي ثغرة Henning. أما الحسابات المتعلقة بالكثافة الطيفية للاستطاعة SDP فقد تم تنفيذها بطريقة Welch لمجال الترددات $0 [Hz] \div 17,5 [kHz]$. المخطط البياني لنتائج معالجة الإشارات الارتجاجية لإحدى الحالات، أي عند قيم محددة للعوامل المؤثرة ϕ_{afd} ، P_e ، p_{fuel} موضح على الشكل (6).



الشكل (6) نتائج معالجة الإشارات الارتجاجية بطريقة Welch عند قيم محددة للعوامل المؤثرة P_e ، P_{afid} ، p_{fuel}

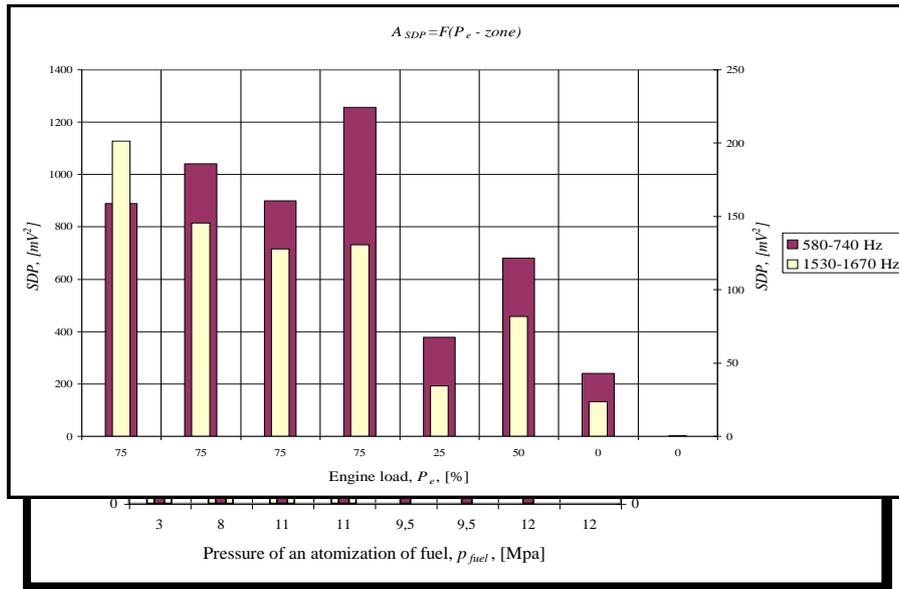
بعد معالجة النتائج التي تم الحصول عليها للكثافة الطيفية SDP، الموضحة في الجدول (2) يمكن استنتاج أن أكثر مجالات التردد دلالة على الحالة الفنية للبخاخات هو المجال المحصور بين $7,5 [kHz] \div 1 [Hz]$. تم تقسيم هذا المجال إلى 102 مجال جزئي بحيث يتواجد في كل واحد من هذه المجالات الجزئية قيمة أعظمية (ذروة). في المجالات المجمعة تم تحديد قيم الذروة للترددات. بعد ذلك بالنسبة لترددات الذروة في كافة المجالات تم حساب قيم ثوابت الارتباط لكل عامل من العوامل المؤثرة. نتيجة الحسابات تم الحصول على قيم ثوابت الارتباط المحددة لقوة تأثير العوامل المؤثرة (ضغط تذبذب الوقود، حمولة المحرك وزاوية تسبيق حقن الوقود) على بارامتر الخرج الذي يمثل قيمة تردد الذروة للكثافة الطيفية للاستطاعة SDP بالنسبة لكل مجال. بعد ذلك تم ترتيب قيم ثوابت الارتباط مما سمح بتحديد مجالات التردد القريبة بالقيمة والتوضع الموافقة لعوامل التأثير. هذه المجالات كانت كما يلي:

- بالنسبة لتغيرات ضغط تذبذب الوقود $120 \div 430 [Hz]$, $6680 [Hz] \div 7240 [Hz]$ ؛
- بالنسبة لتغيرات حمولة المحرك $580 \div 740 [Hz]$, $1530 \div 1670 [Hz]$ ؛
- بالنسبة لتغيرات زاوية حقن الوقود $1670 \div 1810 [Hz]$.

عامل التأثير المتمثل في زاوية تسبيق حقن الوقود يملك قيمة منخفضة لثابت الارتباط (0,27) وبالتالي قوة تأثيره على بارامتر الخرج ضعيفة وغير مستقرة. بتحليل العلاقة بين مطالات ترددات الذروة ضمن المجالات المدروسة للكثافة الطيفية لاستطاعة الإشارة الصوتية الارتجاجية SDP، الصادرة عن البخاخات وبين عوامل التأثير يمكن أن تكون العلاقة بين العوامل المؤثرة و SDP ليست خطية، وإنما من الدرجة الثانية أو الثالثة، بالإضافة إلى ذلك هذه العوامل تؤثر بشكل مشترك فيما بينها. إن هذه الحقيقة تنطبق أيضاً على العوامل المدروسة ضمن برنامج التجارب المنفذة في هذا البحث. من خلال تحليل علاقة SDP لترددات الإشارة الصوتية الارتجاجية بضغط تذبذب الوقود ضمن المجالات $2120 \div 3430 [Hz]$ ، $6680 \div 7240 [Hz]$ ، الموضحة على الشكل (7)، يمكن أن نستنتج أن قيمة SDP للإشارة الصوتية الارتجاجية الصادرة عن البخاخات تملك قيمة أعظمية عند ضغط تذبذب الوقود $p_{fuel} = 3 [MPa]$ ضمن المجالات المشار إليها أعلاه. يمكن تفسير ذلك بأنه في هذه الحالة لا يحدث تذبذب للوقود في حجرة الاحتراق لأن الوقود لا يتذبذب ويدخل إلى حجرة الوقود على شكل تيار. إن ذلك يؤدي إلى اشتعال انفجاري لكميات كبيرة من الوقود، وإلى عمل غير مستقر (غير منظم) للمحرك، وإلى ازدياد استطاعة الإشارات الصوتية الارتجاجية على هذه المجالات.

الجدول (1) نتائج معالجة الإشارة الارتجاجية وقيم ثوابت الارتباط لعوامل التأثير مع العلاقة المدروسة

رقم المجال	1	2	3	4	95	96	97	98	99	100	101	102	مطالات التردد [mV]		التردد ذو المطال الأعظمي [Hz]	P _{rel} [%]	P _{rel} [MPa]
													φ _{rel} [grad]	P _e [%]			
7389	62	124	186	248	6885	6957	7029	7101	7173	7245	7317	7389					
	250,2	583,4	919	1055	17994,4	19928	18254,8	14335	13369,4	17983,4	19005	14292,6					
	235,4	329,8	162,2	151,2	6116,2	10096,4	11868,2	12538,8	10372,6	7321	4726,2	4428,8					
	93,82	106,64	81,82	100,3	3426,42	4583,44	5788,8	5612,1	4400,9	4826,06	5508,92	4023,38					
	98,8	114,16	89,06	97,88	4385,6	6642,98	11030,3	11939,1	8263,68	5946,3	4312,58	2828,68					
	32,4	34,4	33,2	33,7	1,2	1	1,3	0,8	0,8	0,8	0,9	0,9					
	18,2	39,1	64,6	70,2	0,9	0,8	0,7	0,7	0,4	0,3	0,4	0,5					
	13,26	16,5	10,6	9,22	0,48	0,4	0,32	0,3	0,38	0,36	0,34	0,3					
	0,0274	0,01416	0,00832	0,01278	0,02838	0,02622	0,02028	0,01062	0,01054	0,01244	0,01328	0,01418					
عوامل التأثير																	
	0,8028	0,9289	0,9317	0,9227	0,8966	0,8695	0,7541	0,6414	0,7374	0,8623	0,8652	0,8826					
	0,7538	0,63199	0,46937	0,4597	0,61506	0,68984	0,78244	0,81785	0,79087	0,68463	0,61588	0,62169					
	0,0133	0,00989	0,0063	0,0018	0,04168	0,07768	0,19705	0,2627	0,18926	0,04795	0,0495	0,0655					



الشكل (7) العلاقة بين SDP وضغط تذرير الوقود

عند ازدياد ضغط تذرير الوقود حتى القيمة $p_{fuel} = 8$ [MPa] تنتظم عملية حقن الوقود في الاسطوانة، مما يؤدي إلى تحسن نوعية التذرير والى انتظام عمل المحرك وانخفاض استطاعة الإشارة الصوتية الارتجاجية للمحرك. مع ازدياد ضغط تذرير الوقود حتى القيمة $p_{fuel} = 11$ [MPa] عند حمولة للمحرك 75 % يظهر مجالان للتردد $120 \div 430$ [Hz] و $6680 \div 7240$ [Hz]، وتزداد قيمة SDP للإشارة الصوتية الارتجاجية عند ضغط التذرير $p_{fuel} = 9,5$ [MPa]. هذه الزيادة في قيمة SDP ناتجة عن ازدياد حمولة المحرك وعن انحراف قيمة زاوية تسبيق حقن الوقود عن قيمتها الاسمية، مما يؤدي إلى تغيرات في عملية احتراق الوقود داخل الاسطوانة، والى عدم انتظام حركة قطع المحرك وبالتالي إلى ازدياد استطاعة الإشارة الارتجاجية.

بتحليل العلاقة بين قيمة SDP للإشارة الارتجاجية وحمولة المحرك، الموضحة على الشكل (8) نجد أنه عند ثبات قيمة $P_e = \text{const}$ لا يوجد تشتت كبير في قيمة SDP. بتخفيض حمولة المحرك من 75% إلى 0% ويفصل البخاخات الخاضعة للتشخيص يُلاحظ انخفاض واضح لقيم SDP للإشارة الارتجاجية داخل المجالات الترددية التالية: $580 \div 740$ [Hz] و $1530 \div 1670$ [Hz] وهذا ناتج عن انخفاض ضغط حقن الوقود في الاسطوانات عند تخفيض الحمولة، وكذلك عن انخفاض استطاعة الإشارة الارتجاجية الناجمة عن احتراق كمية أقل من الوقود. في مجال الترددات $1530 \div 1670$ [Hz] يحدث انخفاض في استطاعة الإشارة الارتجاجية بسبب ازدياد ضغط تذرير الوقود من 3 إلى 11 [MPa]. وهذا الشكل يمثل نتائج عدد من التجارب لذلك يمكن أن تختلف قيمة SDP في كل مرحلة عن السابقة.

الشكل (8) العلاقة بين SDP وحمولة المحرك

تغيرات قيم SDP للإشارة الارتجاجية ضمن المجال $580 \div 740$ [Hz] عند الحمولة $P_e=75\%$ تتعلق بزاوية تسبيق حقن الوقود. من تحليل المجالات الترددية للبارامتر SDP نجد أن أكثر المجالات الترددية ارتباطاً مع حمولة المحرك هي: $120 \div 430$ [Hz] و $580 \div 740$ [Hz] و $1530 \div 1670$ [Hz]. بعد تحديد مجالات الترددات الأكثر دلالة على الحالة الفنية للقطعة المدروسة من المحرك (بخاخات الوقود)، وفعالية العوامل الأكثر تأثيراً ضمن هذه المجالات تم إعداد مصفوفة قيم ترددات الذروة في هذه المجالات وعلاقتها مع عوامل التأثير المدروسة في هذا البحث وهي: ضغط تذيير الوقود (p_{fuel}) وحمولة المحرك (P_e)، الموضحة في الجدول (2).

الجدول (2) العلاقة بين مطالات الترددات وعوامل التأثير

P_{fuel}	F_1	F_2	F_3	F_4	P_e
9.5	0	0	0	0	25
9.5	0	0	0	1.5	50
12	7.12	9.14	7.52	0.76	0
12	0.86546	0.3089	0.27618	0.03702	0
5	256.4	154.2	58.2	501.8	50
5	207.725	127.425	52.85	517.425	0
5	191.7	147.98	108.48	347.26	0
5	116.81652	81.4093	31.44622	117.99792	0
11	17.6628	8.7046	3.66452	95.68714	0
11	15.6298	6.46196	3.46228	96.16942	0
11	18.38	10.94	5.16	98.08	0
11	48.16	26.72	14.4	197.56	0
11	43.98	21.78	19.58	183.52	0
11	35.6	17.08	14.18	144.76	0

بذلك تم تحديد هذه المجالات كما يلي:

$$F_1=11520 \div 11592 \text{ [Hz]}; F_2=11592 \div 11664 \text{ [Hz]}; F_3=11664 \div 11736 \text{ [Hz]}; F_4=8707 \div 8777 \text{ [Hz]} \quad (8)$$

استناداً إلى ذلك تم التوصل إلى النموذج الرياضي الذي يُوصف المسألة المدروسة. إن اختيار مستوى تأثير ثوابت النموذج الرياضي وفق معيار ستيودنت *Student* فسح المجال بحذف قيم العوامل المنخفضة التأثير من العلاقة النهائية للنموذج الرياضي والتي أخذت الشكل التالي:

$$(9) p_{\text{rel}} = 11,03562 - 0,2F_1 + 0,35F_3 + 0,023F_4 - 0,01F_1F_3 + 0,0094F_2F_3 + 0,0012F_1^2 - 0,033P_e$$

إن تقييم مستوى مطابقة النموذج الرياضي الذي تم الحصول عليه للنتائج الفعلية التي تم تنفيذها من خلال ثوابت الارتباط. وكذلك باستخدام مقياس Cheddock تم التأكد أن هذا النموذج جيد ويمكن اعتماد نتائجه أثناء تقييم الحالة الفنية لبخاخات الوقود في المحركات البحرية. قيمة ثابت الارتباط بلغت $R = 0,824$.

بذلك يُقترح اعتماد المنهجية التي تم إعدادها في هذا البحث لمعالجة الإشارات الصوتية الارتجاجية لتقييم الحالة الفنية لبخاخات الوقود في المحركات البحرية، والتي من المفضل أن تُنفذ وفق التسلسل التالي:

● مرحلة تحضير المعطيات:

1. اختيار الحساسات وفق عرض الطيف المدروس B؛
2. حساب مجال التقطيع الزمني $\Delta t = 1/(2B)$ ؛
3. حساب تردد التقطيع الزمني $f_d = 1/\Delta t$ ؛
4. استناداً إلى نتائج الحسابات، اختيار المحول التشابهي- الرقمي بتردد تقطيع لا يقل عن f_d ؛
5. حساب تردد Nyquist $f_N = 1/(2 \cdot \Delta t)$ ؛
6. استناداً إلى قيمة تردد Nyquist اختيار مرشح (فلتر) تشابهي للترددات الصغرى بتردد قطع $f_c = 0,7 \cdot f_N$ ؛

7. تحديد الفترة الزمنية المطلوبة للتسجيل T انطلاقاً من الشرط $T \cdot B \gg 1$ ؛

8. إعداد برنامج تسجيل الإشارة؛

9. اختيار المرشح التشابهي للترددات العظمى بحزمة تمرير لا تقل عن $f_p \geq 1/T$ ؛

10. تجميع المنصة وضبط وتوليف أقسامها.

● مرحلة تنفيذ التجارب العملية:

1. تحديد عوامل التأثير الخاضعة للدراسة وإعداد مخطط التجارب؛

2. تنفيذ التجارب وتدوين القياسات للإشارات الارتجاجية.

● مرحلة معالجة المعطيات واستخلاص النتائج:

1. إعداد برنامج حساب الكثافة الطيفية لاستطاعة الإشارة الارتجاجية واستناداً إلى طريقة التحويلات

السريعة لسلاسل فورييه (Fast Fourier Transformation Algorithm) Fourier وعند الضرورة يجب ملاحظة الترشيح الرقمي للمجالات المدروسة؛

2. حساب SDP وإعداد جداول قيم مستويات SDP وإنشاء المخططات المطلوبة؛

3. تحليل القيم التي تم الحصول عليها للبارامتر SDP، ثم تحديد المجالات الأكثر دلالة على الحالة

المدروسة، وتحديد قيم ترددات الذروة للبارامتر SDP وتقاطعاتها؛

4. إجراء التحليل الترابطي لمطالات الذروة للبارامتر SDP، وتحديد المطال الأكثر دلالة على الحالة

المدروسة؛

5. استناداً إلى النتائج التي يتم التوصل إليها يتم إعداد جدول المطالعات للبارامتر SDP بدلالة عوامل التأثير ومن ثم إجراء التحليل التراجمي بهدف إعداد النموذج الرياضي المطلوب.

الاستنتاجات والتوصيات:

1. باستخدام الوسائط والطرق الحديثة للتكنولوجيا الرقمية والحواسيب الالكترونية والمحولات التشابيهية الرقمية يمكن وبمستوى دقة عالٍ إجراء القياسات المتعلقة بالإشارة الصوتية الارتجاجية الصادرة عن محركات الديزل البحرية مع توفر إمكانية تسجيل ومعالجة هذه الإشارات مهما كانت سرعات جريانها [10 μ s]؛
2. دراسة الخصائص الصوتية الارتجاجية للمحركات وضحت إمكانية تحديد العلاقات الأكيدة بين البارامترات التصميمية لأقسام جهاز الوقود والبارامترات التشخيصية الصوتية الارتجاجية؛
3. باستخدام طريقة التحويلات السريعة لسلاسل فورييه Fourier في معالجة الإشارة الارتجاجية لخرائط مضخة الوقود ذات الضغط العالي في محركات الديزل البحرية تم الحصول على مخططات الكثافة الطيفية لاستطاعة الارتجاجات SDP ضمن المجال [0÷12000 Hz]؛
4. التحليل الترابطي أكد قوة العلاقة بين البارامتر SDP وضغط تذبذب الوقود على عدة مجالات طيفية؛
5. النموذج التشخيصي لضغط تذبذب الوقود الذي تم التوصل إليه في هذا البحث، والمعتمد على تحديد عوامل التأثير على SDP يُعطي إمكانية تقييم الحالة الفنية لبخاخات الوقود بدقة تتراوح ضمن المجال %10÷5؛
6. المنهجية التي تم إعدادها في هذا البحث لمعالجة الإشارات الصوتية الارتجاجية تسمح بتقييم الحالة الفنية ليس فقط لقطع جهاز الوقود وإنما لبقية قطع محركات الديزل البحرية.

المراجع:

1. ZLOBIN V.G. and et. al. *The theory, designing and maintenance of shipboard thermal engines*. Part 3. Features of maintenance of shipboard thermal engines on different conditions. Saint Petersburg: publishing house Naval academy, 2004.
2. IORISH Y.I. *Measurement of vibration. The general theory, methods and devices*. Moscow: publishing house Mechanical engineering, 1999.
3. *Vibration of power machines*. The handbook under edition Grigoreyva N.V. Saint Petersburg: publishing house Mechanical engineering, 2004.
4. *Vibrations in technical equipment*. The directory. In 6 tomes. T.3. Fluctuations of machines, designs and their elements. Under edition Dmitrintberga F.M. and Kolesnikova K.S. Moscow: publishing house Mechanical engineering, 2004.
5. ZLOBIN V.G, BARANOVSKIY V.V. *Shipboard propulsive plants*. Saint Petersburg: publishing house Naval academy, 2003.
6. TUZOV L.V. *The basic sources of the increased vibration and noise of diesel engines*. Moscow: // Transport mechanical engineering, 2002, N 5.
7. TUZOV L.V. *Research vibro activity ship high-speed diesel engines*. Saint Petersburg: publishing house GMTU, 2003.
8. GENKIN M.D., SOKOLOVA A.G. *VIBRO acoustical diagnostics of machines and mechanisms*. Moscow: publishing house Mechanical engineering, 2004.
9. GORSHKOV V.F., LYENNOY V.B. and et. al. *Technical diagnosing diesel engines*. Sankt-Petersburg: publishing house Naval academy, 2006.
10. ARTOBOLEVSKEY I.I., BOBROVNICKEY Y.I., GENKIN M.D. *Introduction in acoustic dynamics of machines*. Moscow: publishing house Science, 2006.
11. *Vibrations in technical equipment*. The directory in 6 tomes. Under edition Frolova K.V. Moscow: publishing house Mechanical engineering, 2005.

