

توسعه آنالیز ارتعاشی با استفاده از تحلیل گابور در عیب یابی ماشین آلات

مهندس مصطفی رنجبر
دانشجوی کارشناسی ارشد

سیامک اسماعیل زاده خادم
دانشیار

بخش مهندسی مکانیک، دانشکده فنی، دانشگاه تربیت مدرس

چکیده

عیب یابی در ماشین آلات از طریق توسعه تحلیل گابور⁽¹⁾ جهت آنالیز سیگنال ارتعاشی در ماشین آلات هدف اصلی در این مقاله می باشد. ابتدا تحلیل حوزه زمان - فرکانس گابور برای عیب یابی ماشین آلات توسعه یافته و سپس به ارزیابی قابلیت های این روش در مقایسه با روش های سنتی موجود در حوزه زمان و فرکانس برای تحلیل سیگنال ارتعاشی و عیب یابی در ماشین آلات با سیکل کاری پرریودیک پرداخته می شود. برای این امر سیگنال های ارتعاشی مربوط به یک محور دوار سالم و یک محور دوار معیوب را در شرایط کاری یکسان نمونه گیری کرده و سپس ضمن مقایسه نتایج، نسبت به عیب یابی اقدام می شود. همچنین کلیه عملیات فوق برای داده های ارتعاشی مربوط به یک جعبه دنده معیوب نیز تکرار شده و با استفاده از طیف گابور حاصل از پردازش، اقدام به عیب یابی می گردد.

Development of vibration analysis Using Gabor Transformation for Machinery Fault Diagnosis

Siamak Emaeilzadeh Khadem
Associate Professor

M.Ranjbar
Graduate Student

Mechanical Engineering Department, School of Engineering,
Tarbiat Modares University

Abstract

Development of discrete - time Gabor transform for vibration signature analysis of machinery and fault diagnosis is the main aim of this paper. At first, we use time - frequency Gabor transformation for fault diagnosis of machinery and then, we pay attention characteristics evaluation of this method and compare with other present time or frequency domain methods for fault diagnosis of a healthy and faulty rotating shaft with the same working condition and compare the results for fault diagnosis. This procedure is repeated and time domain vibration data for a faulty gearbox is used for fault diagnosis.

دیجیتال، دامنه مدوله شده⁽⁵⁾ AM متناسب با یک پنجره جانبی در نظر گرفته می شود. (شکل ۱)

۳- محاسبه ضرایب تبدیل گابور گسسته شبه متعامد (Cm,n) در محدوده نمونه گیری⁽⁶⁾ ΔN و ΔM ، برای $n=0$ تا $N-1$ برای هر پنجره m برای مجموعه ای از پنجره های $m=0$ تا $M-1$ بنحوی که حاصل $\Delta N \times \Delta M$ کمتر از L گردد. در اینجا M و N تعداد تقسیمات دامنه زمان و فرکانس می باشد.

۴- محاسبه طیف متغیر زمانی انرژی سیگنال ورودی با استفاده از ضرایب Cm,n.

۵- آنالیز سیگنال ورودی در پاسخ به طیف متغیر زمانی جهت محاسبه ضرایب تبدیل فوریه گسسته شبه متعامد از توابع غیر پریودیک و پنجره ای محلی گسسته⁽⁷⁾ (h) تابع کمکی⁽⁸⁾ (γ) مشابه با (h) استفاده می شود که در حقیقت یک تابع گوسی⁽⁹⁾ دارای واریانس σ^2 می باشد. همچنین جهت محاسبه طیف از یک جدول که حاوی مقادیر اولیه محاسبه شده است بهره گرفته می شود.

در ادامه الگوریتم محاسبه طیف گابور شرح داده می شود.

الگوریتم محاسبه گابور

۱- انتخاب یک پنجره با طول L که معمولاً مقدار L به صورت توانی از دو می باشد. به عنوان نمونه $L = 64, 128, 512, \dots$ و پس از محاسبه L ، رزولوشن فرکانسی نیز از طریق فرمول زیر محاسبه می گردد:

$$\Delta f = \frac{fs}{L} \quad (1)$$

که در آنجا fs فرکانس نمونه گیری و L ، مقادیر مناسب برای پردازش ماشین آلات دوار، $L = 128, 256$ ، می باشد.

۲- انتخاب یک نرخ نمونه گیری مضاعف⁽¹⁰⁾ بصورت زیر:

$$\text{Oversampling - rate} = \frac{L}{\Delta M * \Delta N} \quad (2)$$

که در اینجا ΔM تقسیمات دامنه زمان و ΔN تقسیمات دامنه فرکانس می باشد و مقدار m از صفر تا $(SL/\Delta m - 1)$ ، SL طول نمونه⁽¹¹⁾، و n از صفر تا $(L/\Delta N - 1)$ تغییر می کند. [6]

تغییرات این مقادیر بگونه ای است که یک تابع گوسی توسط تبدیل گابور قابل بیان می باشد.

شکل (۲) بیان کننده موقعیت ضرایب Cm,n در الگوریتم تبدیل گابور می باشد.

امروزه مبحث پردازش دیجیتالی سیگنال بسرعت در شاخه های پردازش سیگنال صوتی، تشخیص تصویر، آکوستیک زیر آبی و آنالیز ارتعاشی سازه ها از جمله گیربکس ها و محورهای دوار، در حال گسترش می باشد که در همین راستا تبدیل گسسته زمانی گابور بعنوان یک ابزار مهم در بیان و آنالیز سیگنال های گسسته زمانی غیر پایدار⁽²⁾ مطرح می باشد. در تبدیل گسسته زمانی گابور، یک سیگنال بوسیله ضرایب تبدیل گسسته زمانی گابور آن سیگنال در حوزه زمان - فرکانس بیان می شود. در حقیقت سیگنال را می توان با استفاده از این ضرایب بازیابی نموده و به آنالیز مجموعه پرداخت. [1],[2],[3]

از جمله موارد کاربرد گسترده این روش، تحلیل ارتعاشی جعبه دنده ها در حوزه زمان - فرکانس جهت آگاهی از زمان ایجاد عیب و تخمین و بررسی روند گسترش عیب در محورهای دوار می باشد. از این روش می توان در کنار سایر روش های حوزه فرکانس و حوزه زمان جهت عیب یابی در محورهای دوار و مونیتور کردن وضعیت آنها استفاده نمود. [4],[5]

لذا اولین قدم عملی مفید در آنالیز طیف متغیر با زمان، تقسیم سیگنال ورودی به مؤلفه های مجزا از هم می باشد که این مؤلفه های مجزا از هم، قابلیت آنالیز جداگانه با روش های گوناگون را دارا می باشند.

در مقاله فوق از داده های مربوط به یک محور دوار سالم و یک محور دوار معیوب حاوی اطلاعات مربوط به مؤلفه های فرکانسی متغیر با زمان استفاده شده است. در ابتدا مجموعه سیگنال های دیجیتالی وارد یک محیط نرم افزاری پردازشگر اولیه شده که حاصل آن محاسبه ضرایب تبدیل گابور گسسته شبه متعامد⁽³⁾ (Cm,n) می باشد. و سپس یک طیف انرژی⁽⁴⁾ متغیر با زمان حاصل از این ضرایب محاسبه می گردد و در نهایت در محیط پردازشگر ثانویه، طیف تحت آنالیز ثانویه قرار گرفته و نتایج نهایی خروجی از برنامه جهت رسم نمودار آماده می شود.

پردازش

بصورت خلاصه کلیه مراحل پردازش سیگنال جهت محاسبه طیف گابور بصورت ذیل می باشد:

۱- دریافت مجموعه سیگنال دیجیتال مربوط به محور دوار.

۲- نمونه گیری از مجموعه سیگنال دیجیتال با استفاده از پنجره های با طول L ، هر پنجره شامل مجموعه ای از سیگنال های دیجیتال است که به اندازه طول سیگنال های

ضرایب گابور $C_{m,n}$ بصورت پراکنده و گسسته می باشند و برای بازیابی کامل طیف نیاز به میانبازی نقاط میانی ضرایب $C_{m,n}$ می باشد. بعد از حذف تداخل های متداخل در توزیع ویگنر- وایلی، طیف انرژی بوسیله فرمول (۷) قابل محاسبه است:

$$GS_s(i,k) = 4$$

$$\sum_{m=-\frac{L}{\Delta M}+1}^{\infty} \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} |C_{m,n}|^2 \exp \left[- \left[\frac{(i-m.\Delta M)^2}{\sigma^2} + \left(\frac{2\pi\sigma}{L} \right)^2 (k-n.\Delta N)^2 \right] \right]$$

$$0 \leq i \leq \infty, 0 \leq k \leq \frac{L}{2} - 1 \quad (۷)$$

که در فرمول فوق $GS_s(i,k)$ مقادیر طیف گابور می باشند. ۸- برای هر ضریب گابور $C_{m,n}$ در نقطه $(m\Delta M, n\Delta N)$ مقدار طیف $GS_s(i,k)$ بوسیله فرمول (۷) محاسبه شده و با مقدار قبلی $GS_s(i,k)$ جمع می شود. به عنوان مثال انرژی در نقطه (i,k) در شکل (۵) متأثر از مقادیر ضرایب $C_{32}, C_{31}, C_{21}, C_{22}$ و احتمالاً سایر نقاط می باشد. جهت بیان مطلب فوق به زبان برنامه نویسی داریم:

$$GS_s(i,k) = GS_s(i,k) +$$

$$4 * \exp \left[- \left[\frac{(i-m\Delta M)^2}{\sigma^2} + \left(\frac{2\pi\sigma}{L} \right)^2 (k-n.\Delta N)^2 \right] \right] \quad (۸)$$

که ضریب ۴ در معادله (۸) یک ضریب نرمالیزه شده است و می تواند با توجه به کاربردهای عملی و بخصوص، تغییر کند. زیرا ترمی که عدد ۴ در آن ضرب می شود، وقتی که مقادیر مربوط به نقطه (i,k) از ضرایب گابور $(m\Delta M, n\Delta N)$ تفاوت داشته باشد، سریعاً کاهش می یابد و تکرار در این مرحله محدود به ناحیه بسیار کوچک حول نقطه $(m\Delta M, n\Delta N)$ خواهد شد. اندازه دقیق ناحیه با توجه به کاربردهای خاص این روش مشخص می شود، همچنین ترم نهائی فرمول (۸) باید هر بار محاسبه شده و جهت صرفه جویی می توان مقادیر این ترم را محاسبه کرده و در یک جدول قرار داد و سپس در تکرار محاسبات از این جدول استفاده نمود.

مسئله اصلی در محاسبه طیف، تصمیم گیری در مورد زمان توقف و ابعاد ناحیه جدید حول ضریب $C_{m,n}$ می باشد، بعلا اینکه توزیع انرژی ضرایب $C_{m,n}$ به سمت نقاط همسایه بصورت نمائی کاهش می یابد، لذا نیازی به محاسبه نقاط

نرخ نمونه گیری^(۱۲) برابر با عدد ۴ ترجیح داده شده است. هر چه مقدار نرخ نمونه گیری مضاعف، بزرگتر گرفته شود. به همان نسبت باید محاسبه بیشتری نیز انجام شود. مقدار عددی ۴ بعنوان یک مقدار بهینه جهت داشتن بهترین رزولوشن فرکانسی خروجی با کمترین میزان محاسبات می باشد.

۳- انتخاب ΔM و ΔN به نحوی که:

$$\Delta M * \Delta N = \frac{L}{\text{Oversampling - rate}} \quad (۳)$$

در اینجا فرض می شود که: $\Delta M = 8$ و $\Delta N = 4$ و $L = 128$ محاسبه واریانس σ^2 برای تابع پنجره داده شده بصورت زیر:

$$\sigma^2 = \frac{\Delta M}{\Delta N} * \frac{L}{2\pi} \quad (۴)$$

بدین ترتیب یک تابع محلی گوسی برای تابع پنجره h تأمین می گردد. مقادیر بزرگ واریانس را می توان برای حصول به رزولوشن بهتر در محدوده فرکانسی بکار برد. مقادیر کوچکتر واریانس را می توان جهت رسیدن به رزولوشن بهتر در محدوده زمان بکار برد.

۵- با داشتن L و σ^2 ، تابع پنجره ای گوسی $h[L]$ محاسبه می شود و سپس، تابع کمکی $\gamma[L]$ محاسبه می شود، به نحوی که γ یا h از لحاظ ترم خطای مجموع مربعات مشابه باشند.

۶- زمانی که L نقطه از یک پنجره در نظر گرفته شود، مقدار مطلق ضرایب گابور برای L نقطه بوسیله فرمول زیر محاسبه می گردد:

$$|C_{m,n}| = \left| \sum_{i=0}^{L-1} s(i + m * \Delta M) * \gamma * (i) * e^{-2.n.\Delta N.i} \right| \quad (۵)$$

که در آن $C_{m,n}$ بیانگر ضرایب گابور s تابع زمان، ΔM و ΔN تقسیمات حوزه زمان و فرکانس و γ^* مزدوج مختلط تابع γ می باشد. در هر لحظه ضرایب $C_{m,n}$ با در نظر داشتن مقادیر زیر محاسبه می شود:

$$m,n = 0,1,\dots,N-1 \quad (۶)$$

همانطور که ملاحظه می شود، فرم محاسبات انجام شده همانند محاسبات تبدیل فوریه سریع^(۱۳) می باشد.

۷- پس از آنکه ضرایب $C_{m,n}$ برای $S(i)$ محاسبه شدند، طیف سیگنال با استفاده از توزیع ویگنر- وایلی متقاطع حذفی^(۱۴) محاسبه می شود [7] لازم به توضیح است که

مقایسه تبدیل فوریه زمان کوتاه^(۱۵)، گابور و ویولت^(۱۶) [7], [8]

کاربرد کلیه روش‌های فوق در زمینه آنالیز ارتعاشی گرفته شده از سیستم‌های مکانیکی می‌باشد. همچنین سیگنال‌های غیر پایدار حاصل از ضربه‌ها^(۱۷)، اصطکاک و غیره با استفاده از تبدیل‌های فوق و ارزیابی زمانی طیف‌های فرکانسی، مورد مطالعه قرار می‌گیرند. بر خلاف تبدیل فوریه، به منظور استفاده بهینه از مشخصه‌های زمان - فرکانس تبدیل گابور در کاربردهای فوق از پنجره گوسی استفاده می‌کند. نتیجه این امر، اجتناب از مسأله روی هم افتادن پنجره‌های حوزه زمان منتقل شده به حوزه فرکانس و اثرات آن بر روی وضوح طیف زمان - فرکانس، می‌باشد. همچنین با توجه به ماهیت پریودیک بودن سیکل کاری سیستم‌های مکانیکی مورد بررسی، استفاده از تبدیل گابور در آنالیز سیگنال‌های دارای مؤلفه سینوسی ارجحیت دارد، ولی برای آنالیز سیگنال ارتعاشی با تغییرات خیلی شدید در فرکانس‌های بالا استفاده از خواص لگاریتمی بزرگنمایی تبدیل ویولت، جهت بیان بهتر سیگنال در حوزه زمان - فرکانس ترجیح داده می‌شود. همچنین جهت آنالیز ارتعاشات گذرا^(۱۸) و بررسی مشخصات و رفتار دینامیکی این نوع ارتعاشات از تبدیل ویولت استفاده می‌شود. [۹]

تحلیل گابور و آنالیز ارتعاشی محورهای دوار

در شکل شماره (۴) سیگنال ارتعاشی گرفته شده از یک محور دوار سالم در حوزه زمان نمایش داده شده است. محور دوار فوق دارای فرکانس کاری $f_1=100$ (HZ) می‌باشد. با توجه به نمودار حوزه زمان سیگنال محور دوار معیوب، ملاحظه می‌شود که محور فوق دارای عیب نابالانسی می‌باشد. ولی با مد نظر قرار دادن طیف‌های فرکانسی مربوطه شاهد یک پیک در دامنه می‌باشیم که این امر نشانگر فرکانس کاری سیگنال محور دوار می‌باشد (شکل ۵).

حال با اعمال تبدیل گابور به سیگنال‌های حوزه زمان محور دوار معیوب به بررسی شرایط آن در حوزه زمان - فرکانس می‌پردازیم.

همانطور که در شکل‌های (۶ و ۷) مشاهده می‌شود، تنها یک پیک دامنه در طیف فرکانسی و طیف گابور متعلق به محور دوار معیوب مشاهده می‌شود که این امر بیانگر وجود عیب نابالانسی در محور دوار می‌باشد.

تحلیل گابور و آنالیز ارتعاشی جعبه دنده‌ها

در شکل شماره (۹) سیگنال ارتعاشی گرفته شده از یک جعبه دنده معیوب در حوزه زمان نمایش داده شده است. جعبه دنده فوق دارای فرکانس‌های دندانه‌ای $f_1=100$ (HZ) و $f_2=150$ (HZ) می‌باشد که این مطلب با توجه به نمودار حوزه فرکانس سیگنال جعبه دنده معیوب نیز قابل ملاحظه می‌باشد، شکل (۱۰). با توجه به نمودار حوزه فرکانس مشاهده می‌گردد که جعبه دنده فوق دارای عیب‌هایی نظیر عدم هم محوری در چرخ دنده دارای فرکانس دندانه‌ای $f_1=100$ (HZ) و نابالانسی دندانه‌ای $f_1=150$ (HZ) می‌باشد [11], [12] حال با اعمال تبدیل گابور به سیگنال‌های حوزه زمان چرخ دنده معیوب به بررسی شرایط آن در حوزه زمان - فرکانس می‌پردازیم.

همانطور که در شکل (۱۰) مشاهده می‌شود، یک پیک دامنه در طیف گابور متعلق به چرخ دنده دارای فرکانس دندانه‌ای $f_1=150$ (HZ) وجود دارد که این امر بیانگر وجود عیب نابالانسی می‌باشد و همچنین در چرخ دنده دارای فرکانس دندانه‌ای $f_1=100$ (HZ) شاهد پیک‌های تکراری در هارمونیک‌های فرکانس فوق می‌باشیم که این ناشی از وجود عیب عدم هم محوری در چرخ دنده فوق می‌باشد، شکل (۱۱ و ۱۲) که این امر مطلب فوق را تأیید می‌کند.

نتیجه گیری

یکی از خصوصیات بارز طیف گابور این است که نویزهای موجود در سیستم تأثیر کمی بر آن دارد و با تقویت نسبت سیگنال به نویز^(۱۹)، همانند یک فیلتر عمل می‌نماید. تبدیل فوریه گسسته^(۲۰) و تبدیل فوریه سریع، تکنیک‌های ابتدایی مورد استفاده در سیستم‌های پردازش سیگنال دیجیتال می‌باشند. البته محدودیت اصلی این روش‌ها این است که این روش‌ها قابلیت بیان دقیق چگونگی طیف فرکانسی سیگنال بر حسب زمان را ندارند.

روش قدیمی مورد استفاده برای آنالیز سیگنال‌های دارای مؤلفه‌های فرکانسی متغیر با زمان، روش تبدیل کوتاه زمانی فوریه می‌باشد. این الگوریتم بر مبنای محاسبه تبدیل فوریه تعداد زیادی از پنجره‌های کوچک زمانی سیگنال ورودی می‌باشد. تبدیل هر کدام از پنجره‌های کوتاه زمانی ترکیب شده، جهت تولید یک طیف متغیر با زمان از سیگنال ورودی بکار می‌رود. اما، طیف متغیر زمانی تولید شده توسط تکنیک تبدیل فوریه گسسته دارای رزولوشن بسیار خوبی نمی‌باشد. همچنین این تکنیک از نظر محاسباتی بسیار گران تمام می‌شود.

تبدیل گابور، ابزار دیگری برای پردازش دیجیتال سیگنال می‌باشد که تولید کننده یک طیف مشترک زمان - فرکانس از

تابع سیگنال در حوزه زمان
مقدار تبدیل گابور سیگنال در حوزه زمان
واریانس

زیر نویس ها

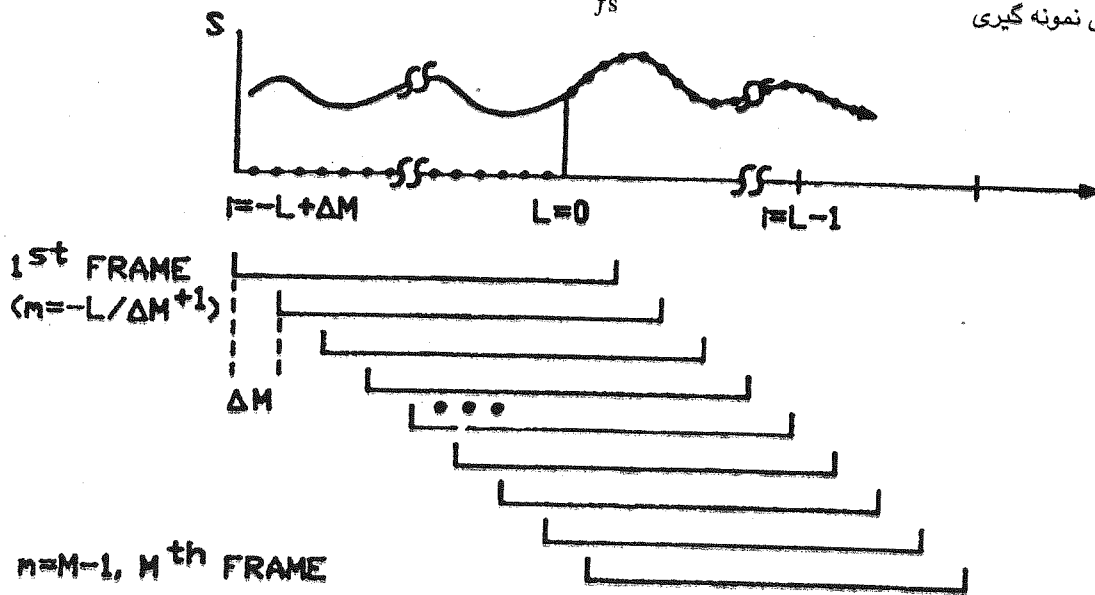
- 1- Gabor transformation analysis
- 2- Non-stationary discrete-time signals
- 3- Biorthogonal-like discrete Gabor transformation coefficient
- 4- Energy distribution
- 5- Amplitude modulation
- 6- Sampling interval
- 7- localized discrete window function
- 8- Biorthogonal auxiliary window function
- 9- Gaussian function
- 10- Oversampling rate
- 11- Sample length
- 12- Sampling rate
- 13- Fast Fourier transformation
- 14- Cross term Deleted Wigner-Ville Distribution
- 15- Resolution
- 16- Short time Fourier transform
- 17- Wavelet transform
- 18- Impacts
- 19- Transient vibration
- 20- Signal to noise ratio (SNR)
- 21- Discrete Fourier transform (DFT)

سیگنال می باشد. البته کاربرد این روش بخاطر مشکل بودن انتخاب اولیه تابع پنجره مجازی شبه اورتاگنال (γ) دارای محدودیت می باشد. همچنین فقدان یک حل عمومی برای تبدیل گسسته گابور نامحدود باعث ایجاد محدودیت در استفاده از این روش پردازش دیجیتالی می باشد و این روش قابلیت اعمال موفقیت آمیز در تولید طیف انرژی متغیر با زمان را دارا نمی باشد. بهمین دلیل در مقایسه با سایر روش های آنالیز حوزه زمان - فرکانس همانند تبدیل ویگنر - وایلی از کاربرد کمتری برخوردار است اما اساس کار آن همانند تبدیل ویگنر - وایلی می باشد.

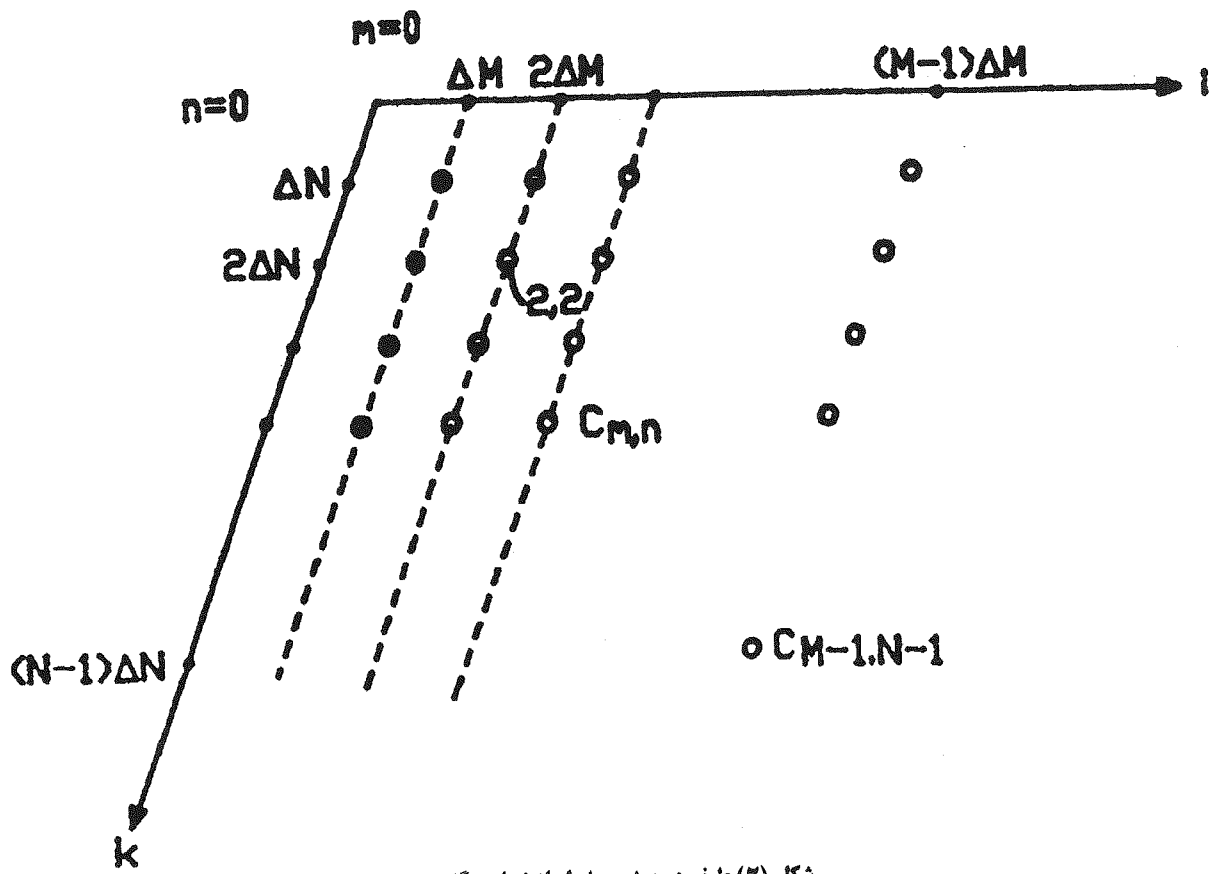
امروزه موارد کاربرد صنعتی جدیدی برای تبدیل زمان - فرکانس گابور از جمله در آنالیز ارتعاشی موتورهای احتراق داخلی و توربین های گاز مطرح شده است. [۱۳]
از موارد دیگر کاربرد تبدیل گابور در تست جعبه دنده ها در شرایط کاری تحت کنترل و بار گذاری تکراری می باشد. همچنین استفاده از تبدیل گابور در زمانیکه آنالیز حوزه زمان یا فرکانس ارضا کننده نباشد، بسیار مفید می باشد. علت این امر، بهبود وضوح تصویر، نسبت سیگنال به نویز (21) بهتر در مقایسه با طیف حاصل از تبدیل ویگنر - وایلی می باشد.

فهرست علائم

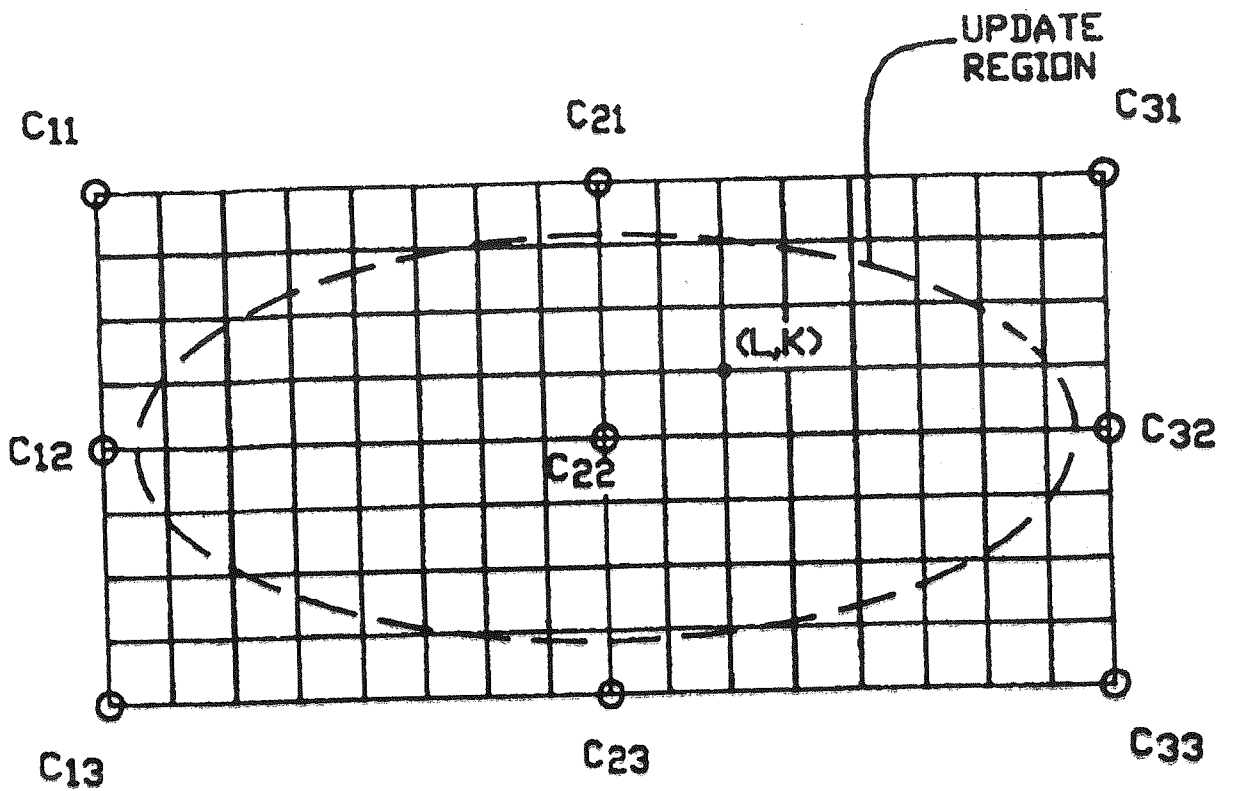
m	تغییرات در حوزه زمان
n	تغییرات در حوزه فرکانس
ΔM	تقسیمات در حوزه زمان
ΔN	تقسیمات در حوزه فرکانس
L	طول پنجره نمونه گیری
fs	فرکانس نمونه گیری



شکل (۱) نحوه انتخاب پنجره از سیگنال در حوزه زمان.

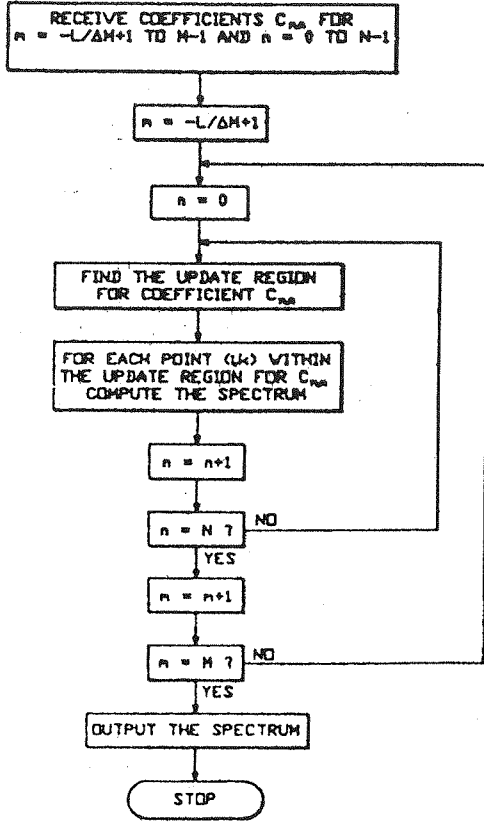


شکل (۲) طیف دو بعدی حاصل از ضرایب گابور.

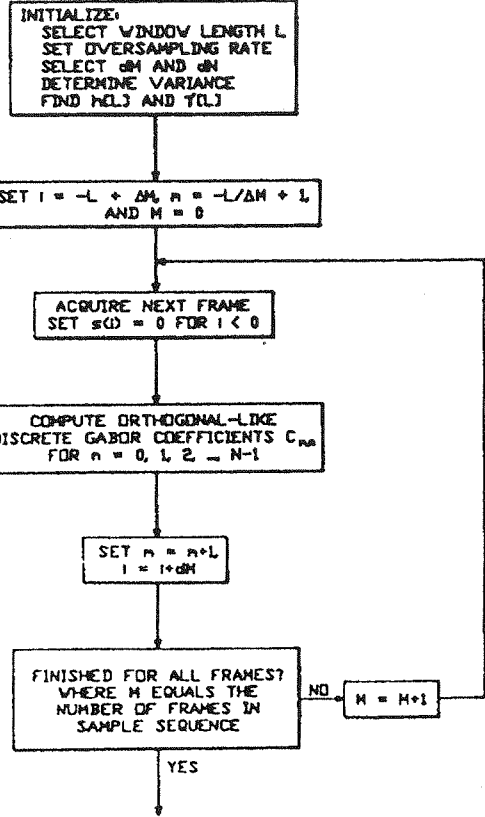


شکل (۳) نحوه تاثیر گذاری نقاط مجاور در محاسبه مقدار ضریب گابور.

*



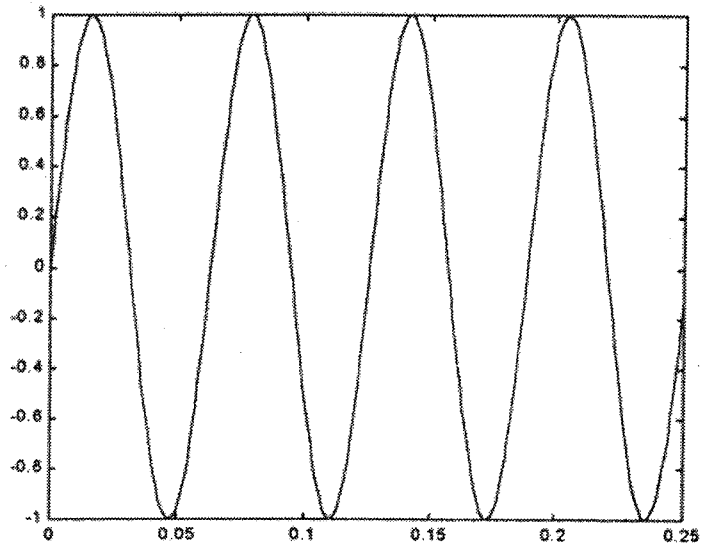
ادامه شکل (۴ - الف)



*

شکل (۴ - الف) فلوجارت روند محاسبه طیف گابور.

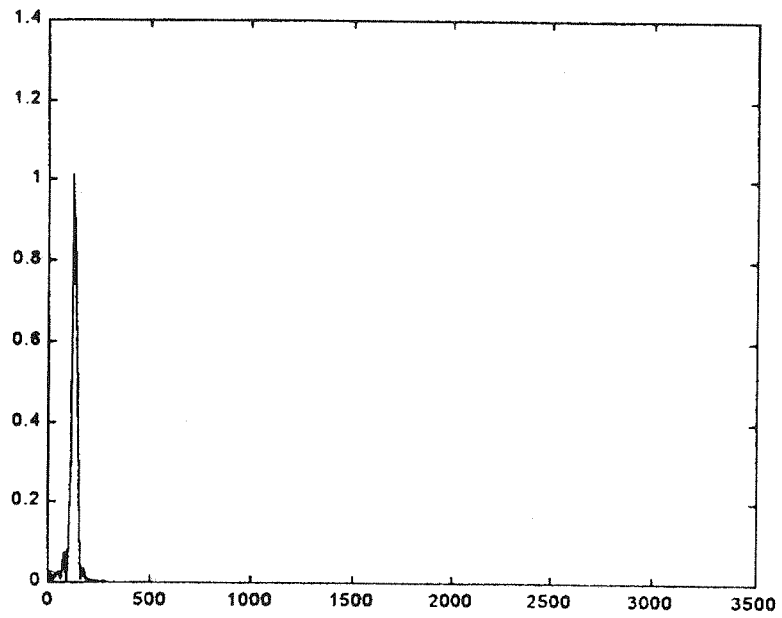
دامنه (mm/s)



شکل (۵) نمودار مربوط به سیگنال گرفته شده از یک محور دوار بالانس در حوزه زمان.

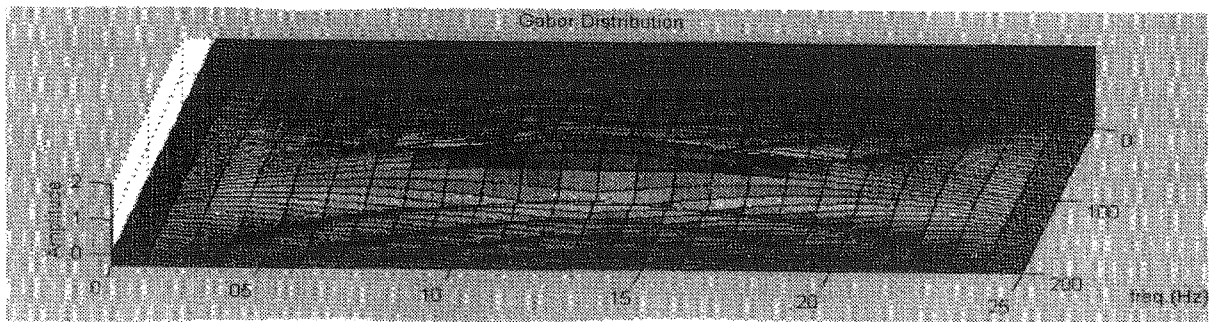
زمان (S)

دامنه (db)

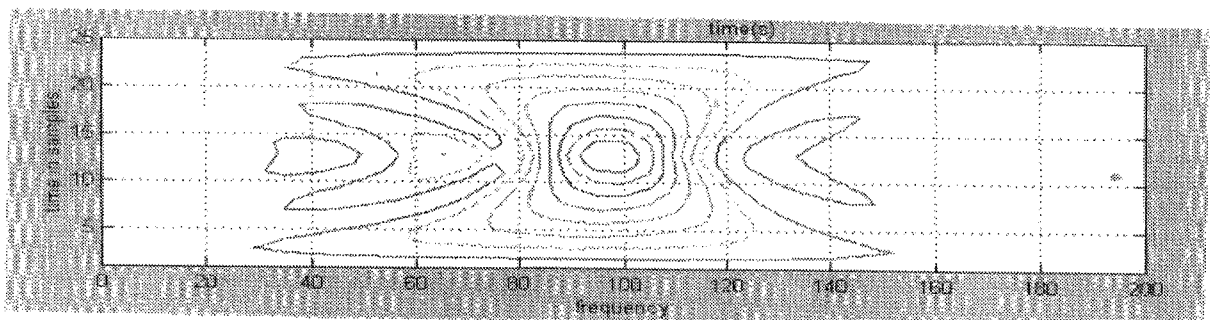


فرکانس (HZ)

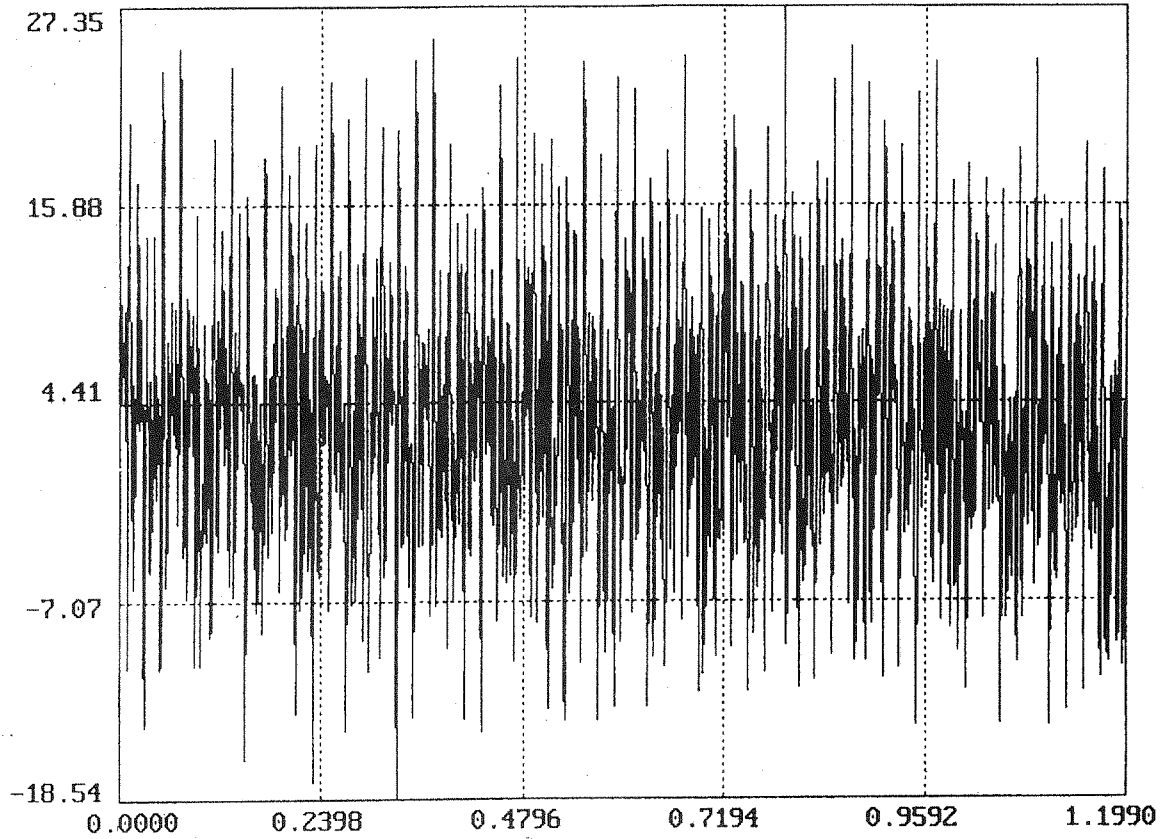
شکل (۶) نمودار مربوط به سیگنال گرفته شده از يك محور دوار معيوب در حوزه فرکانس (فرکانس کاری ۱۰۰ هرتز).



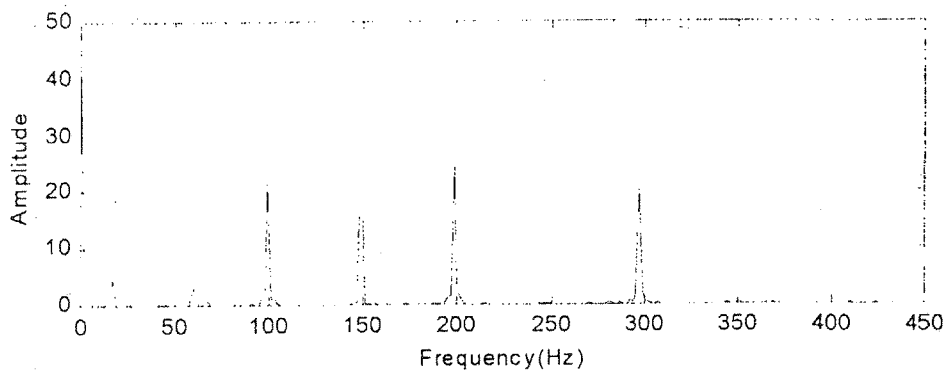
شکل (۷) طيف گابور مربوط به سيگنال گرفته شده از يك محور دوار معيوب در حوزه زمان - فرکانس.



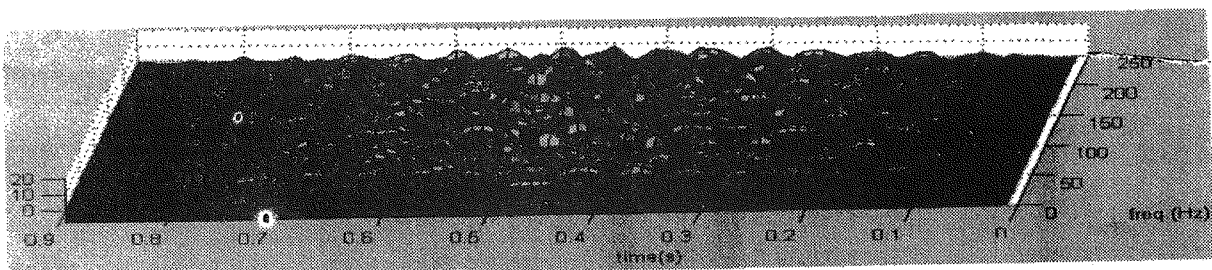
شکل (۸) کانتور گابور مربوط به سيگنال گرفته شده از يك محور دوار معيوب در حوزه زمان - فرکانس.



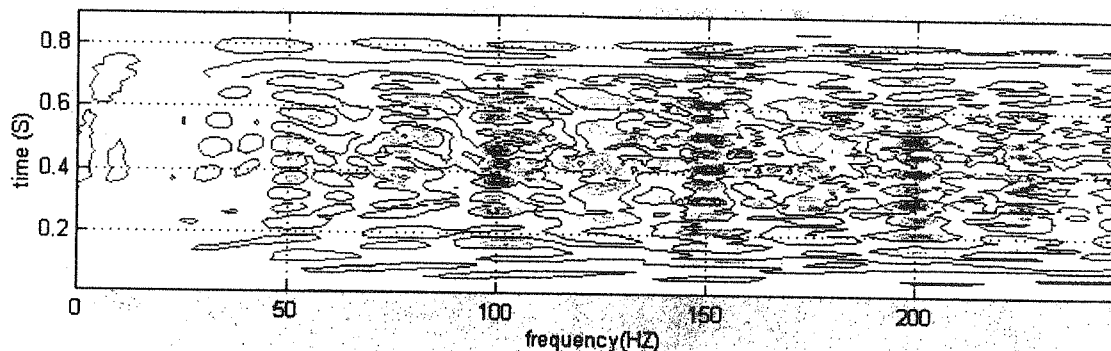
شکل (۹) سیگنال ارتعاشی گرفته شده از يك جعبه دنده معيوب در حوزه زمان.



شکل (۱۰) طيف حوزه فرکانس سیگنال ارتعاشی گرفته شده از يك جعبه دنده معيوب.



شکل (۱۱) طيف گابور سیگنال ارتعاشی گرفته شده از يك جعبه دنده معيوب در حوزه زمان - فرکانس.



شکل (۱۲) کانطور گابور مربوط به سیگنال گرفته شده از یک چرخ دنده معیوب در حوزه زمان - فرکانس.

مراجع

- [1] D.Gabor "Theory of communication" J. IEE (London), Vol.93, No. III, November, 1946, PP. 429-457.
- [2] Wexler, et. al. "Discrete gabor expansion", Signal Processing, Vol. 21, No. 3, November, 1999, PP. 207-221.
- [3] Rene Carmona, "Practical time - frequency analysis", Princeton University, April, 1998.
- [4] P.D.Mcfadden, "Gear diagnostics by interpreting images of time-frequency energy distribution of vibration signals", Comadem'3, Bristol, 1993.
- [5] P.D.Mcfadden, G.T.Zheng, "Application of the wavelet transform to the early detection of gear failure by vibration analysis", Department of Engineering Science, Oxford University, Report OUEL 1999/93, 1993.
- [6] Oian et..al, "Method and apparatus for time varying spectrum analysis", United States Patents, No:5, 353, 233, October, 1994-National Instruments, Inc, Austin, Texas.
- [7] Qian, et. al. "Wigner distribution decomposition and cross - term interference cancellation", UMBC Technical Report No, EER-91-1, University Of Maryland, January, 1991.
- [8] Alan G. Haddow, Taner Onsay, "Comparison of STFT, Gabor, and wavelet transforms in transient vibration analysis of mechanical systems", ASA 125th Meeting, Ottawa, May-1993.
- [9] Shitanda, Motoshi, "Vibration analysis method", United States Patent, No." 5, 710, 715, Jun. 20. 1999.
- [10] S.E., Wright, "Time domain machine diagnostics", Insight-Non-Destructiv Testing, V37, n8, Aug. 1995, pp: 611-615.
- [11] J. Tyler, "The vibration analysis handbook", Vibration Consultants Inc., Tampa, Florida, VCI Copyright 1999.
- [12] Carl. Schenck. AG "Machine diagnosis" Seminar40, Schenck company, Germany, 1994.
- [13] SWRI Automatic Transmission Technology, "Power train component noise testing", SWRI Project, No:03-7172, 1998.