УДК 685.34.016: 621.752

МЕТОДИ ДІАГНОСТУВАННЯ МАШИН ЛЕГКОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

С.Л. ГОРЯЩЕНКО

Хмельницький національний університет

Одним зі шляхів ефективного використання машин є їх діагностика, що проводиться з метою виявлення відхилень в роботі обладнання. Аналіз вібросигналів на основі вейвлет аналізу дає можливість більш точно підійти до діагностики машин. Крім того скорочується час на обробку сигналів. Запропоновано програмний продукт для реалізації цього методу

При роботі обладнання легкої промисловості виникають небажані моменти, що пов'язані зі збоєм їх роботи, які призводять до їх зупинки та ремонту. Попередження таких моментів покращило б продуктивність любого виробництва. З цією метою розглянемо існуючі методи діагностування стану вузлів обладнання. Один з основних напрямків діагностування обладнання є аналіз вибросигналу.

Об'єкти і методи досліджень

При аналізі стаціонарних сигналів, як правило, буває достатньо застосування спектрального аналізу на основі швидкого перетворення Фур'є (ШПФ). Основними проблемами при цьому є: збільшення відношення сигнал-шум, яке досягається шляхом усереднювання і синхронного накопичення і мала роздільна здатність аналізу у високочастотній області, що вимагає застосування процедур детектування (аналіз тієї, що огинає). [1] Традиційний спектральний аналіз не ефективний для нестаціонарних сигналів з тимчасовим масштабом нестаціонарної багато меншим тривалості, що підлягає аналізу реалізації. Це пов'язано з усереднюванням потужності флуктуацій при спектральному аналізі (спектр потужності) по всьому часу спостереження сигналу. Найбільш очевидним шляхом застосування ШПФ до аналізу нестаціонарних сигналів є розбиття реалізації на окремих коротких рівно довгі ділянки з подальшим застосуванням алгоритму ШПФ до кожного з них. Цей прийом широко відомий в практиці аналізу сигналів як ШПФ на коротких реалізаціях (Short time FFT). Відмітною особливістю аналізу на коротких реалізаціях є необхідність застосування згладжуючих вікон (наприклад, вікон Хеммінга, Ханна, вікна "flet-top" і ін.). Як відомо, без них посилюється вплив ефекту розтікання дискретних складових в бічні пелюстки. Обмежене число ділянок розбиття (число спектрів) обмежує роздільну здатність аналізу в тимчасовій області, тому надалі були запропоновані ряд алгоритмів аналізу з ковзаючими згладжуючими і усереднюючими вікнами.

Найбільш відомими є найбільш ранній варіант аналізу з ковзаючим вікном гауса Габора і найбільш розвинений і ефективний аналіз цього типа відомий як розподіл Вигнера-Вилли (WW Distribution). [2,3] Застосування алгоритмів аналізу з ковзаючими вікнами дозволяє істотно збільшити роздільну здатність аналізу в тимчасовій області при збереженні достатньо високого дозволу в частотній області, проте зв'язано із значним збільшенням об'єму обчислень, а отже і із збільшенням часу розрахунку. Тому для адекватної оцінки амплітуд гармонік при аналізі в цих частотних областях необхідно забезпечити велику роздільну здатність аналізу по частоті. Цього можна досягти шляхом використання кратного октавного аналізу (1/3-октавного, 1/6-октавного, 1/12-октавного). При цьому так же кратно зростають і об'єми обчислень.

Постановка завдання

Методи аналізу, що розглянуті вище, широко застосовуються при поглибленому аналізі сигналів у час-частотної області, наприклад при розпізнаванні мови, але зазвичай не підходять для вирішення завдань діагностики машин, оскільки аналіз не задовольняє вимозі оперативного вироблення на основі його результатів інтегральної діагностичної ознаки. Отримувані в результаті аналізу тривимірні (частота-час-амплітуда) образи достатньо складні для формального розпізнавання. Не дивлячись на те, що вейвлет аналіз так само може бути віднесений до методів час-частотного аналізу, ми покажемо, що на його основі, з урахуванням внутрішнього властивого йому октавного (кратне октавному) частотного темпу аналізу, характерного для традиційного аналізу акустичних сигналів, можливе набуття ознак еволюції сигналів вібрації придатних у тому числі і для вирішення завдань вібродіагностики.

За своєю суттю вейвлет є ортогональним базисом розкладання функцій у функціональному гильбертовому просторі елементи якого визначаються параметрами a, b і задаються виразженням [3]:

$$\Psi_{a,b} = \pi^{-1/4}|a|^{-1/2}\Psi\left(\frac{t-b}{a}\right), \qquad (1)$$

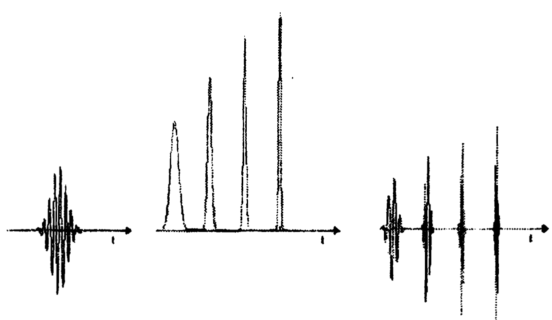
де $\Psi(t)$ - функція, що проводить або материнська

Слід зазначити, що широке використання як базис розкладання гармонійних функцій (розкладання Фур'є) створює ілюзію його єдності. В даний час усвідомлена необхідність використання у ряді випадків інших базисів розкладання, наприклад розкладання в базисах функцій Уолша або Хара. Вейвлет декомпозиція повинна розглядуватися як один з методів аналізу в нетрадиційному базисі, проте цей метод має ряд принципових переваг. Як функція вейвлета, що проводить, можна використовувати її основний варіант, відомий як функція Морле, яку можна записати у вигляді:

$$\Psi = e^{i2\pi f_0|t|e^{-\frac{|2|^2}{2}}}, \qquad (2)$$

де $f_0 = 1/2\sqrt{\ln 2}\,Гц \approx 0{,}6Гц$, t – час в с.

Аналіз функції (2) показує, що вона є гармонікою з частотою f_0 під вікном $e^{-\frac{|2|^2}{2}}$. Форма цього вікна близька до форми вікна Габора (дзвіночок Гауса). На рис. 1а приведений вид реальної частки функції (2), який і називають вейвлетом або сплеском. Слід зазначити, що вибір значення f_0 задає співвідношення між ефективною шириною цього вікна і періодом гармоніки. У нашому випадку ефективна ширина вікна в тимчасовій області прийнята рівної періоду аналізованої гармоніки, що відповідає максимальній роздільній здатності аналізу за часом.



а) б) в)

Рис. 1. **Вигляд вейвлету**

Якщо набути значення параметра шкали $a = 2^{-j/B}$ і параметра тимчасової локалізації $b = 2^{-j/B}k$, де j, k - натуральні числа; B - кількість смуг аналізу що доводяться на октаву, те вираження для коефіцієнтів декомпозиції сигналу $x(t)$ в базисі $\Psi_{a,b}(\Psi_{j,k})$ набере вигляду:

$$\omega_{j,k} = \int dt x(t) \Psi^*_{j,k}(t)$$

де

$$\Psi_{j,k}(t) = \pi^{-1/4} 2^{j/2B} \exp\left\{-h^2\left(2^{j/b}n - k\right)^2/2\right\} \exp\left(i2\pi f_0 h \left|2^{j/B}n - k\right|\right),$$

або

$$\omega_{j,b} = \int dt x(t) \Psi^*_{j,b}(t), \tag{3}$$

де

$$\Psi_{j,b}(t) = \pi^{-1/4} 2^{j/2B} \exp\left\{-2^{2j/b} h^2 (n-b)^2/2\right\} \exp\left(i2\pi f_0 2^{j/B} h |n-b|\right), \tag{4}$$

де B- число смуг, що доводяться на одну октаву; n і b- цілі числа, відповідні поточному номеру відліку на реалізації і номеру відліку, відповідному максимуму вікна короткої хвилі на реалізації, відповідно; зірочка означає процедуру комплексного сполучення. Аналіз виразів (3), (4) показує, що вэйвлет-декомпозиция при відповідному виборі:

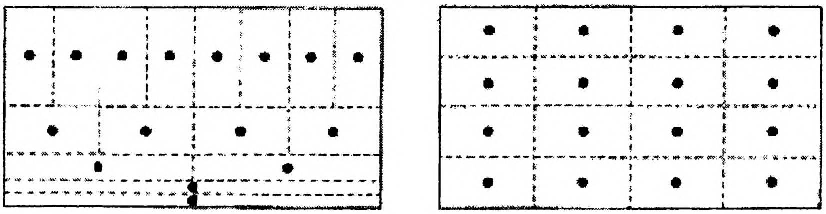
$$i = B \log_2(f/f_0), \tag{5}$$

стає аналогічною перетворенню Фур'є на коротких реалізаціях із специфічним нелінійним в сенсі залежності від частоти усереднюючим вікном (вейвлет вікном):

$$g_{j,b} = \pi^{-1/4} 2^{j/2B} \exp\left\{-2^{2j/b} h^2 (n-b)^2/2\right\}. \tag{6}$$

У цьому і полягає суть відмінності вейвлет декомпозиції від перетворення Фур'є на коротких реалізаціях. Зміна геометрії вікна при фіксованій позиції в часі (b=const) дозволяє як би вдивлятися в сигнал по частоті в темпі октави. Вейвлет аналіз є важливим проривом в розумінні процедур розпізнавання образів людиною і тваринами, що привело до широкого використання його в розробці систем штучного інтелекту. Проте від вейвлета не слід чекати чудес. Як і раніше, частотною межею аналізу є частота Найквіста.

Відмітною особливістю вейвлет аналізу є його висока чутливість до короткочасних високочастотних флуктуацій сигналу, оскільки вейвлет вікно забезпечує адекватну оцінку таких флуктуацій за рахунок одночасного збільшення амплітуди вікна при зменшенні його ширини (рис. 2а). В зв'язку з цим слід зазначити, що у зв'язку з вейвлет аналізом часто згадують принцип невизначеності Гейзенберга. Роздільна здатність аналізу в тимчасовій області зростає із зростанням частоти. У цьому полягає принципова відмінність вейвлет аналізу від перетворення Фур'є на коротких реалізаціях при якому роздільна здатність аналізу за часом не залежить від частоти і пов'язана тільки з роздільною здатністю аналізу в частотній області, абсолютне значення якої не залежить від частоти (рис. 2б).



a) b)

Рис. 2. **Грати дискретних станів (*j,b*) залежно від типа перетворення (*j* - по вертикалі, *b* - по горизонталі)**

Розгледимо варіант октавного аналізу ($B=1$) в характерному для віброакустики діапазоні частот до 10 кгц. Хай довжина реалізації $t_n = 5$ *с*, інтервал між відліками відповідно до теореми Найквіста $h = 50$ *мкс*, тоді потужність реалізації $Q=10^5$ відліків, $j_{min} = 1,\ j_{max} = j = log_2(10000/0{,}6) \approx 14$. Записане в кінцевих різницях співвідношення (3) з урахуванням (4) при $B=1$ приводить до виразження для коефіцієнтів:

$$\omega_{jb} = \sum_{n=b-N/2}^{n=b+N/2} hx(n) g_{j,b} \exp\left(i 2\pi f_0 2^{j/B} h|n-b|\right), \tag{7}$$

де N - частка реалізації Q, що знаходиться під вікном (4). Роздільна здатність аналізу в часі залежить від частоти (від параметра j, так само званого "шкалою") відповідно до вираження:

$$\Delta b_j = 2^{[(j_{\max}-j)/B]}$$

Так, для j=14 Δb=1 або 50 мкс, при j=1 $\Delta b=2^{13}=8192$ або 410 мс, тому для максимальної частоти (10 кГц) ми повинні розрахувати 10^5 коефіцієнтів на реалізацію, а для мінімальної частоти (0,6 кГц) - лише 11 коефіцієнтів на реалізацію (рис. 2а).

Якщо в разі цифрового Фур'є аналізу коефіцієнти Фур'є повинні розглядуватися як міра кореляції сигналу з відповідною не локалізованою в часі гармонікою, то в разі вейвлет аналізу, мова йде про мірі кореляції з відповідними локалізованими в часі сплесками (рис. 1в).

На рис.3 приведені результати аналізу віброприскорення відцентрового насоса з ознаками кавітації. Приклад ілюструє високу ефективність аналізу в області граничних (преднайквістових) частот.

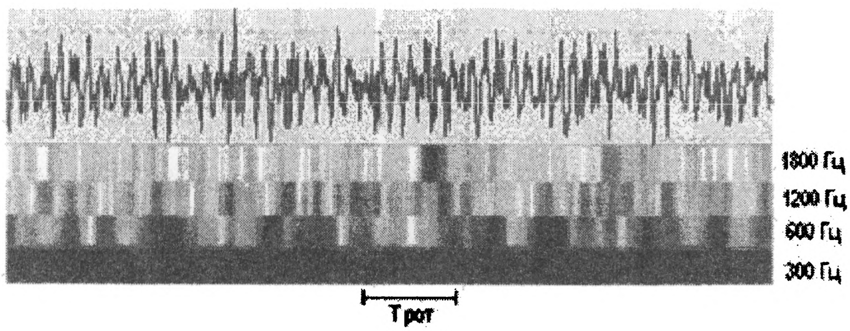


Рис. 3.

Якщо розглядувати низькочастотні і середньочастотні коливання в машинах, то в основному вони є суперпозицією гармонік (основних і вищих) або суперпозицією вузькосмугових процесів з кратними частотами (частоти обертання, зубцеві, лопатеві частоти і їх вищі гармоніки). Тому для адекватної оцінки амплітуд гармонік при аналізі в цих частотних областях необхідно забезпечити велику роздільну здатність аналізу по частоті. Цього можна досягти шляхом використання кратного октавного аналізу (1/3-октавного, 1/6-октавного, 1/12-октавного). При цьому так же кратно зростають і об'єми обчислень.

Досвід роботи [4] з перетворенням (3), (4) привів до виводу про те, що в більшості випадків для оцінки еволюції нізко- і середньочастотної вібрації в часі достатньо проведення аналізу для основної і трьох вищих гармонік коливання. Це досягається при 1/3-октавном вейвлет аналізі. Номер треть-октавної смуги, відповідній основній гармоніці коливання знайдемо із співвідношення:

$$j = \mathrm{int}\left[B\log_2(f/f_0)\right], \qquad (8)$$

яке відрізняється від співвідношення (5) тим, що тут підкреслена необхідність виділення цілій частці із співвідношення (5). У свою чергу, виділення цілій частці (округлення в меншу сторону) приводить до того, що частоти під другою експонентою виразження (4) можуть істотно відхиляються від дійсних частот гармонік. Тому для аналізу сигналів в нізко- і середньочастотних областях ми пропонуємо використовувати перетворення :

$$\omega_{jlb} = \sum_{n=b-N/2}^{n=b+N/2} hx(n) g_{jl,b} \exp\left(i2\pi l f h |n-b|\right),$$

де f- частота основної гармоніки; l - номер гармоніки; N-частка реалізації Q, що знаходиться під вікном (4), визначається, виходячи з прийнятого значущого відхилення від нуля функції вікна, асимптотика прагнучої до нуля на нескінченності. Зокрема, ми приймаємо N з умови:

$$g_{jl,b}\Big|_{n=N/2} < 0{,}01 g_{jl,b}\Big|_{n=b} \qquad (10)$$

Аналіз виразження (9) показує, що у такому вигляді вейвлет аналіз може розглядуватися як різновид час-частотного аналізу з ковзаючим вікном (4), що володіє властивостями вейвлета. При цьому налаштування вікна смугове (треть-октавна), а налаштування частоти аналізу точне. Для фіксованого значення b коефіцієнти вейвлета для основної гармоніки wj1,bі трьох вищих гармонік *wj2,b*, wj3,b, wj4,b можуть бути знайдені з виразження (9) при j1 = *int{B[log2 (f/f0)]}int[3(log2 f)+2,2]; j2=j1+3; j3=j1+5; j4= j1+6,* де f- частота основної гармоніки. Час на виконання такого розрахунку на декілька порядків менше, ніж час на розрахунок (7). На рис. 1б приведені функції вікна для чотирьох гармонік (основний і три вищих), на рис. 1в приведені відповідні вейвлети (сплески), мірою кореляції сигналу з якими у нинішній момент часу є коефіцієнти $w_{jl,b}$. У цьому принципова відмінність вейвлет аналізу від Фур'є аналізу.

Результати та їх обговорення

Структурна схема системи діагностування стану машин легкої промисловості, що використовує вищезгаданий метод, показана на рис.4

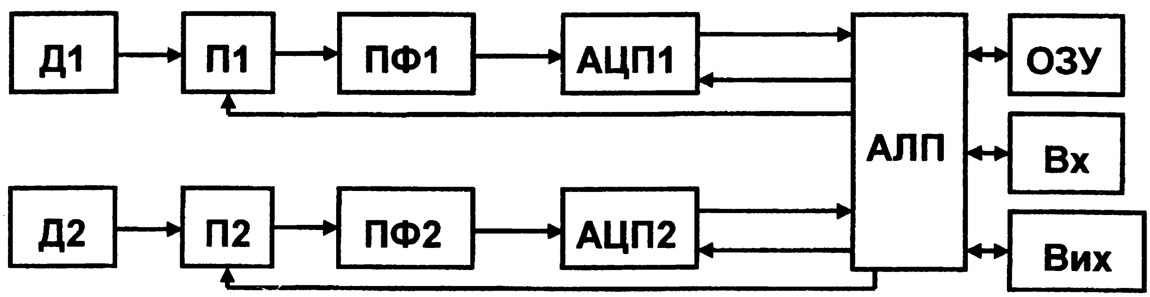


Рис. 4. **Структурна схема системи діагностування стану МЛП**

На схемі позначені:

- Д1, Д2 – вібраційні датчики;
- П1, П2 – підсилювачі зі змінним коефіцієнтом підсилення;
- ПФ1, ПФ2 – смугові фільтри нижніх частот;
- АЦП1, АЦП2 – аналого-цифрові перетворювачі;
- АЛП – арифметико-логічний пристрій;
- ОЗУ – оперативно запам'ятовуючий пристрій;
- ВхП – вхідний пристрій (миш, клавіатура);
- ВихП – вихідний пристрій (дисплей).

Інформативними параметрами в такій моделі коливань є значення амплітуд дискретних складових спектру на частоті обертання ротора і її гармоніках і швидкість їх зміни при збільшенні напрацювання механізму. Амплітуди коливань на роторних частотах визначаються найчастіше величиною дисбалансу, неспіввісністю валів, кінематичними погрішностями і відношенням критичної частоти обертання ротора до робочої.

Інтерфейс програмного забезпечення для вищезгаданого методу показана на рис.5

З прикладу, ясно, чому вейвлет аналіз називають "частотним мікроскопом". Навіть у октавному варіанті він забезпечує високу чутливість до високочастотних флуктуацій сигналу при одночасно високому дозволі їх в часі. В той же час, аналіз має малу роздільну здатність по частоті. Так j=14 відповідає частота f 10 кГц, а j=13 вже відповідає частота f 5 кГц. Якщо високочастотна флуктуація має певну частоту (вузькосмугова флуктуація) з частотою, не співпадаючою з вказаними вище, ми отримаємо занижену оцінку амплітуди флуктуації. На щастя, для вібрації машин в основному характерні широкосмугові високочастотні флуктуації, що робить це зауваження стосовно вібродіагностики неістотним. Тому однозначно можна рекомендувати використовувати октавний вейвлет аналіз для дослідження розподілу високочастотних флуктуацій сигналів вібрації машин в часі. Програючи в дозволі по частоті, ми виграємо при цьому в дозволі за часом.

Висновки

Метод відкриває нові можливості діагностики машин і конструкцій, що базуються на його основних достоїнствах, до яких відносяться:

- висока чутливість до прояву в сигналі синусоподібних хвиль малої амплітуди і тривалості;
- висока чутливість до малих відхилень форми коливань від досконалої форми незалежно від зміни їх амплітуди (енергії);
- відносний характер контрольованого параметра (коефіцієнта форми).

Ці переваги приводять до того, що з'являється можливість, використовуючи вимірювальні тракти для вібрації і повітряного шуму, що не вимагають калібрування і метрологічного огляду, розробляти методики і прилади, що дозволяють діагностувати дефекти машин і конструкцій, елементи яких піддаються ударно-імпульсному дії. При цьому ударно-імпульсний характер динаміки машин може бути як природним, наприклад, для машин із зворотно-поступальними кінематичними парами, так і пов'язаним з проявом різного роду аномалій, як в машинах роторного типа. Селективність діагностики забезпечується наявністю характерного набору частот імпульсного відгуку для конкретних деталей і вузлів конкретних машин. Перспективне використання методу для контролю характерних для нелінійної динаміки нестаціонарних резонансних режимів. Відкривається можливість побудови ефективних алгоритмів аналітичної формалізації досвіду діагностики практичних механіків, заснованого на суб'єктивних визначеннях нестаціонарних акустичних процесів типа: вузол «стукає», «дзвенить», «скрипить».

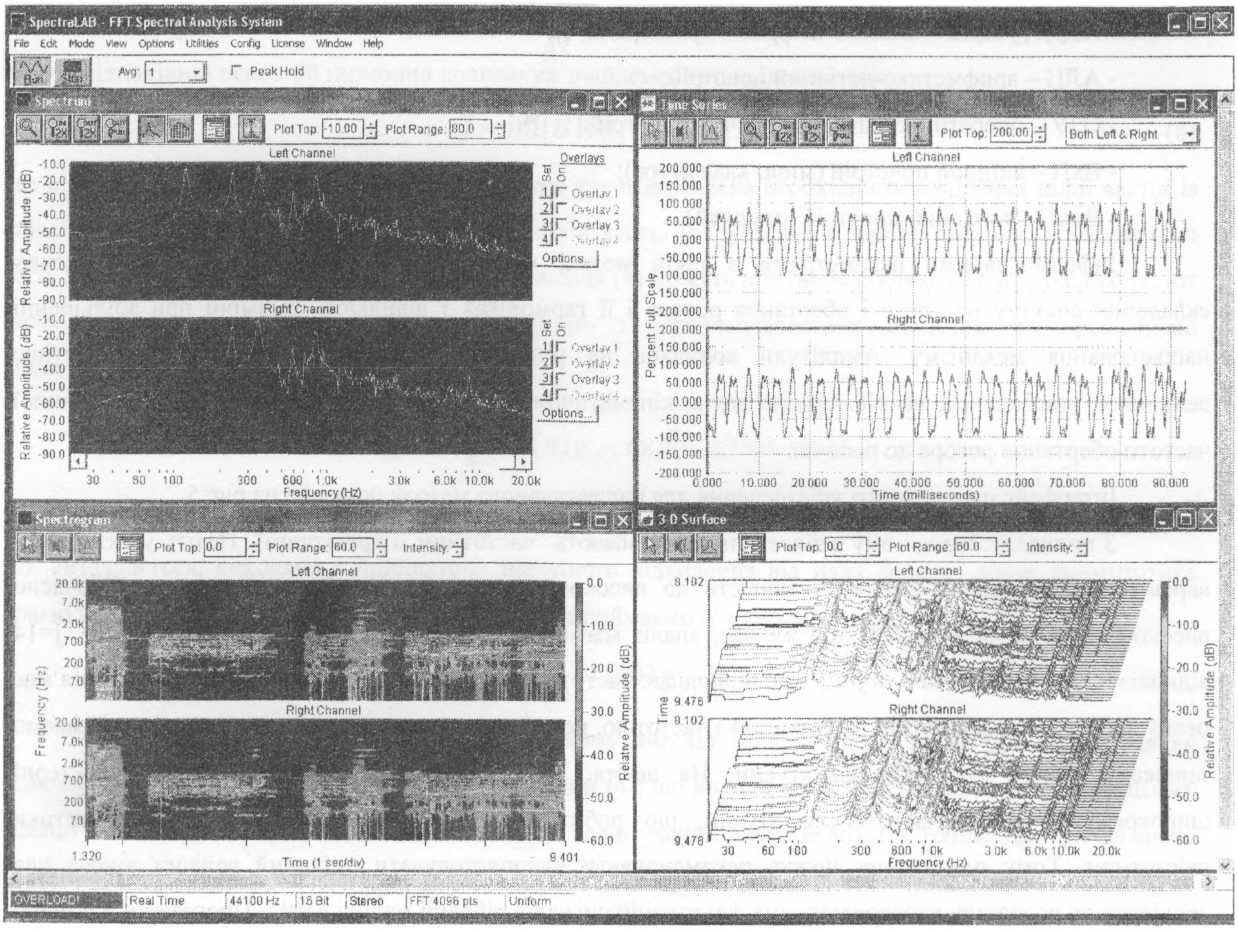


Рис. 5. **Зовнішній вигляд панелей індикації програмного продукту SpectraLab**

ЛІТЕРАТУРА

1. Бендат Дж., Пирсол А. Применение корреляционного и спектрального анализа. - М.: Мир, 1983, 312с.
2. Блейхут Р. Быстрые алгоритмы цифровой обработки сигналов. - М.: Мир, 1989. - 448 с.
3. Г. Нуссбаумер Быстрое преобразование Фурье и алгоритмы вычисления сверток - М. : Радио и связь, 1985.- 55с.
4. Артоболевский И.И., Бобровницкий Ю.И., Генкин М.Д. Введение в акустическую динамику машин. - М.: Наука, 1979. -296с.
5. Ulrich Rosler, Gunter Schwarze, Wilhelm Kammerer Maskenverfahren zur Manipulation von binaren Rasterbildern linienformiger Objekte // Electronishe Informationsverarbeitung und Kybernetik. - 1980. N. 4. - S. 171-184.
6. Измерение, обработка и анализ быстропеременных процессов в машинах / В. П. Максимов, И. В. Егоров, В. А. Карасёв. – М.: Машиностроение, 1987. – 208с.

Надійшла 14.07.2010