

С. Л. ГОРЯЩЕНКО, К. Л. ГОРЯЩЕНКО, Г. М. ДРАПАК
Хмельницький національний університет

РОЗРОБКА ДІАГНОСТИЧНОГО ПРИСТРОЮ З ВИКОРИСТАННЯМ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛІЗУ

В статті розглядається питання діагностики обладнання, а саме якості роботи підшипників, валів та інших тіл обертання. Розроблено схему генератора сигналів складної форми. Механічні коливання, що генеруються вузлами механізмів розповсюджуються по елементах машин і можуть бути зареєстровані на їх поверхні. Для цього використовуються п'єзоелектричні датчики. П'єзодатчики мають високу точність вимірювання і чутливість, володіють високою стійкістю і в той же час мають мініатюрні габарити і масу.

У програмі MatLab реалізовані різні цифрові фільтри для виділення з сигналів інформативних частотних смуг, функція побудови спектрограми, Вейвлет-перетворення, побудова спектрів сигналу, виділення огинаючої сигналу, побудова спектру огинаючої, визначення СКЗ сигналу, піків і ін. Програма використана для обробки віброакустичного сигналу який був зміряний за допомогою датчика вібрації і оцифрований за допомогою АЦП та має відкритий код і може бути оперативно дорацьована під конкретні потреби дослідника.

З метою дослідження вібрації підшипників кочення різних типів, валів, а також тіл обертання проведено визначення методів і засобів вібродіагностики різних дефектів, та в лабораторії кафедри створено діагностичний стенд.

Ключові слова: діагностика, спектральний аналіз, пристрій

S. HORIASHCHENKO, K. HORIASHCHENKO, G. DRAPAK
Khmelnyskyi National University

DEVELOPMENT OF THE DIAGNOSTIC DEVICE USING SPECTRAL ANALYSIS

Traditional methods of analysis of physically realized signals, images and time series generated by complex (polymodal) time systems are mainly based on statistical methods, often on special correlation methods in their various variants. Prior to that, due to the statistical approach to the analysis of signals of the dynamic nature of the processes that generate them, as a rule, follows a different plan. And only a dynamic approach to the analysis of complex system characteristics for modern nonlinear dynamics allows us to consider the analysis of signals as a process of identification of dynamic systems as a result of analysis of experimental data.

The article considers the issue of equipment diagnostics, namely the quality of bearings, shafts and other bodies of rotation. The scheme of the generator of signals of the difficult form is developed. Mechanical oscillations generated by the nodes of the mechanisms propagate through the elements of the machines and can be registered on their surface. Piezoelectric sensors are used for this purpose. Piezo sensors have high measurement accuracy and sensitivity, have high stability and at the same time have miniature dimensions and weight.

MatLab implements various digital filters for extracting informative frequency bands from signals, spectrogram construction function, Wavelet transform, signal spectrum construction, envelope signal selection, envelope spectrum construction, SCR signal definition, peaks, etc. The program is used to process a vibroacoustic signal that has been measured using a vibration sensor and digitized using an ADC and is open source and can be quickly modified to meet the specific needs of the researcher.

In order to study the vibration of rolling bearings of different types, shafts, and bodies of rotation, methods and means of vibrodiagnostics of various defects were determined, and a diagnostic stand was created in the laboratory of the department.

Key words: diagnostics, spectral analysis, device

Вступ

Традиційні методи аналізу фізично реалізованих сигналів, образів і часових рядів, що породжуються складними (полімодальними) динамічними системами, в основному базуються на статистичних методах, найчастіше на спектрально-кореляційних методах в різних їх варіантах [1–4]. При цьому, внаслідок статистичного підходу до аналізу сигналів динамічна суть процесів що їх породжують, як правило, йде на другий план. І лише динамічний підхід до аналізу складних систем характерний для сучасної нелінійної динаміки дозволяє розглядати аналіз сигналів як процес ідентифікації динамічних систем за наслідками аналізу експериментальних даних [5, 6].

Якщо діагностику стану підшипника кочення проводити по амплітудних параметрах часових вібросигналів, то основну увагу слід приділити двом. Це, по-перше, кількісне значення загального рівня фону вібрації і, по-друге, це співвідношення між рівнями фону вібрації і амплітудами пікових значень в часовому вібросигналі.

Сигнал, отриманий після акселерометра (вібродатчика), може бути легко і з великою точністю перетворений в сигнал віброшвидкості за допомогою інтеграції. Ця процедура здійснюється перед проведенням частотного аналізу для того, щоб отримати спектр віброшвидкості. В результаті інтеграції знижується рівень вищих частотних складових в два рази при кожному подвоєнні частоти (6 дБ на октаву). Тому інформація, що міститься в сигналі віброприскорення, візуально наочніше, ніж в сигналі віброшвидкості, якраз унаслідок підкреслення високочастотних складових.

Переміщення осі валу, що обертається в підшипнику, в даному випадку досліджень розуміється під траєкторією. Її графік аналогічний представленню сигналу на осцилографі в координатах X–Y, де X і Y – відповідно переміщення в горизонтальному і вертикальному напрямках.

Для аналізу траєкторій використовується параметр вібропереміщення, а не віброприскорення. При цьому значення має тільки складова на частоті обертання, яка дає найбільш ясну картину про обертання валу. Для отримання графіка траєкторії руху валу зазвичай використовуються не акселерометри, а безконтактні датчики, які знімають сигнал пропорційний зміні зазору між поверхнею валу і корпусом підшипника і дозволяють безпосередньо вимірювати величину переміщення.

Аналіз в частотній області, або спектрі, прекрасний інструмент для виявлення періодичності в сигналі. Великою її перевагою є те, що на одному графіку відображаються амплітуди коливань, що сильно розрізняються за значенням. Діапазон амплітуд, що відрізняються в 10000 разів (80 дБ) не є рідкістю для сучасних аналізаторів спектру.

Основна частина

Для розрахунку характерних частот необхідно знати число елементів кочення, їх діаметр, діаметр сепаратора і кут контакту. Якщо ці параметри відомі, можна визначити всі характерні частоти, що генеруються кожним окремим елементом підшипника. Крім того, в спектрі можлива поява відразу декількох частотних складових, характерних для даного конкретного підшипника.

Структура генератора сигналів складної форми представлена на рис. 1.



Рис. 1. Структурна схема генератора сигналів складної форми

Функціонально до складу генератора сигналів складної форми входять:

- БФЦС – блок формування цифрового сигналу, який дозволяє встановлювати вихідні параметри сигналу – частоту, період, який в цифровому вигляді формується числом виборок;
- АЛП – арифметико-логічний пристрій – забезпечує складну форму цифрового сигналу завдяки взаємодії двох чи більше сигналів (за необхідності);
- ЦАП – цифро-аналоговий перетворювач – необхідний для отримання аналогового сигналу із заданим рівнем шумів квантування;
- ВихП – вихідний пристрій, що забезпечує регулювання рівня вихідного сигналу та його адаптацію до електромагнітного пристрою (ЕМП) навантаження в електромеханічному блоці.

Блок обробки, відповідно до вимог обробки отримання і обробки вібраційної інформації повинен мати наступні функціональні складові, представлені на рис. 2.

Механічні коливання, що генеруються вузлами механізмів розповсюджуються по елементах машин і можуть бути зареєстровані на їх поверхні. Для цього використовуються різні датчики (ємкісні, індукційні, резистивні, електромагнітні) [3]. Але останнім часом найбільшого поширення набули *п'єзоелектричні* датчики. Це пов'язано з тим, що п'єзодатчики мають високу точність вимірювання і чутливість, володіють високою стійкістю і в той же час мають мініатюрні габарити і масу.

Сигнал п'єзоелектричного датчика – *акселерометра* (Д) у вигляді електричного заряду, пропорційного віброприскоренню вхідного сигналу, поступає на вхід *підсилювача заряду* (П1), який здійснює перетворення заряду в пропорційну величину напруги. У загальному випадку П1 є операційним підсилювачем, охопленим ємкісним зворотним зв'язком. Коефіцієнт підсилення П1 автоматично регулюється *мікроконтролером* (МК) так, щоб забезпечити необхідний динамічний діапазон, не допускаючи при цьому перевантаження по вхідному каналу.

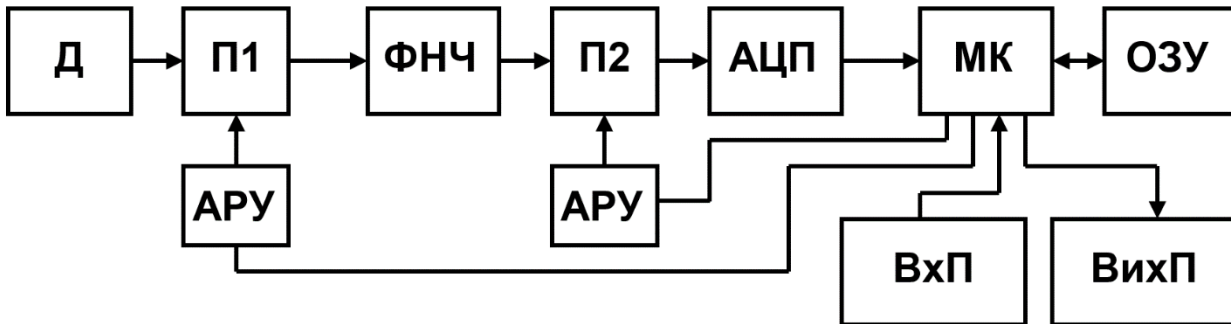
Неповне використання динамічного діапазону приводить до збільшення впливу завад вимірювального каналу на результати і неминуче збільшення погрішності при подальшому перетворенні сигналу в цифрову форму. Перевищення сигналом динамічного діапазону приводить до спотворення форми сигналу і втрат інформації. По суті, за допомогою коефіцієнта підсилення вхідний сигнал нормується так, щоб займати весь динамічний діапазон вимірювального каналу і при цьому зберігати початкову форму сигналу. Змінений таким чином, вихідний сигнал поступає на *фільтр нижніх частот* (ФНЧ), де фільтрується з метою придушення складових, лежачих вище за необхідний діапазон частот. Цей діапазон визначається, перш за все, інформативною складовою сигналу, яка представляє інтерес для подальшого аналізу. Коефіцієнт посилення даного фільтру зазвичай прагнуть привести до 1-ці. Вибір і розрахунок ФНЧ здійснюється виходячи з поставлених вимог до параметрів фільтрації, точності фільтру, коефіцієнта підсилення і ін.

Ослаблений після ФНЧ сигнал поступає на підсилювач (П2), який використовується для посилення сигналу до повного завантаження динамічного діапазону каналу і зменшення помилки щодо квантування по рівню в АЦП. Коефіцієнт посилення підсилювача встановлюється програмно за допомогою МК. Контроль виходу сигналу П2 за задані межі також контролюється МК, аналогічно П1.

З виходу підсилювача сигнал поступає на *аналогово-цифровий перетворювач* (АЦП), який видає двійковий код (результат перетворення). Згідно *теорему Котельникова* частота дискретизації сигналу має бути в 2 рази вище за частоту самого сигналу. Тому, при виборі АЦП необхідно враховувати його швидкодію. Розрядність коду АЦП відповідає повному діапазону аналогового сигналу і визначає роздільну

здатність коди. АЦП принципово властива методична погрішність, обумовлена заміною безперервного аналогового сигналу дискретним сигналом.

Вхідний пристрій (ВхП) включає в себе клавіатуру і дисплей. Клавіатура дає можливість управляти ходом аналізу і отримання початкових даних, а дисплей дозволяє користувачеві отримувати повідомлення про параметри записаного вібросигналу і іншу інформацію. В якості вихідного пристрою (ВихП) зазвичай використовують дисплей і принтер.



Д – датчик; П1, П2 – підсилювачі зі змінним коефіцієнтом підсилення; ФНЧ – фільтр нижніх частот; АЦП – аналого-цифровий перетворювач; МК – мікроконтролер; ОЗУ – оперативно запам'ятовуючий пристрій; ВхП – вхідний пристрій; ВихП – вихідний пристрій

Рис. 2. Структурна схема блоку обробки вібродіагностичної інформації

Система MatLab є одним з наймогутніших математичних пакетів для вирішення різних прикладних завдань (рис. 3). Ця система є світовим стандартом в області наукових і технічних розрахунків. MatLab має безліч пакетів розширення, що дозволяє адаптувати систему до вирішення різних класів математичних і технічних завдань. Математична система Matlab включає пакети обробки сигналів "Signal Processing" і пакет проектування різних цифрових фільтрів "Filter Design" (рис. 4).

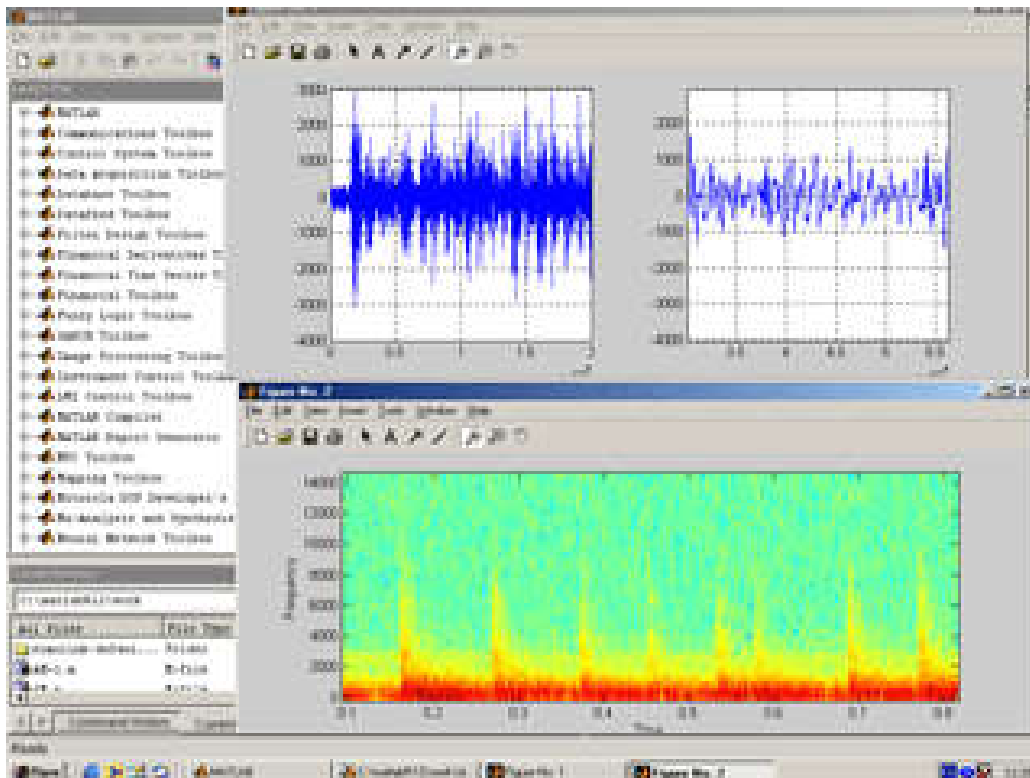


Рис. 3 Приклад обробки сигналу в системі MatLab

У нашому випадку, система MatLab використана для обробки віброакустичного сигналу який був зміряний за допомогою датчика вібрації і оцифрований за допомогою АЦП.

У програмі реалізовані різні цифрові фільтри для виділення з сигналів інформативних частотних смуг, функція побудови спектрограми, Вейвлет-перетворення (рис. 3), побудова спектрів сигналу, виділення огинаючої сигналу, побудова спектру огинаючої, визначення СКЗ сигналу, піків і ін. Програма має відкритий код і може бути оперативно допрацьована під конкретні потреби дослідника.

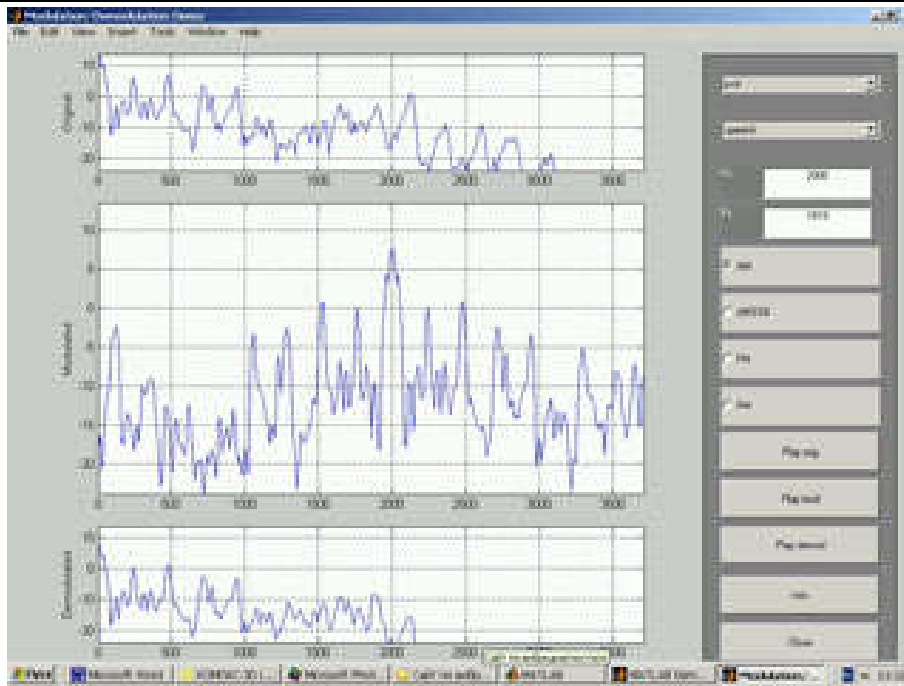


Рис. 4. Програмний модуль для проектування цифрових фільтрів

З метою дослідження вібрації підшипників кочення різних типів, валів, а також тіл обертання проведено визначення методів і засобів вібродіагностики різних дефектів, та в лабораторії кафедри створено діагностичний стенд підшипників кочення. Загальний вид стенду представлений на рис. 5.

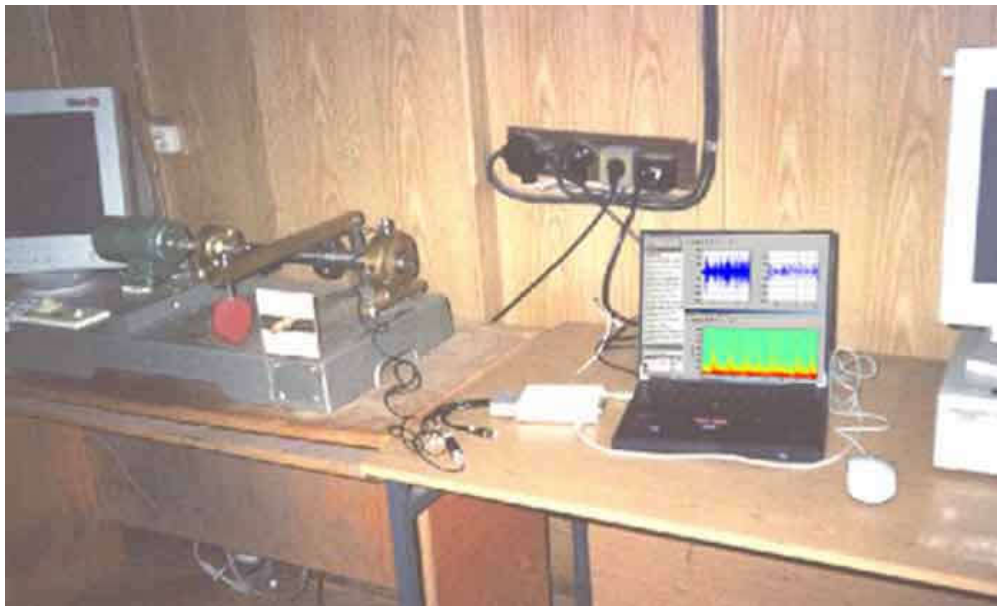


Рис. 5. Загальний вид діагностичного стенду

Стенд дозволяє досліджувати вібраційні параметри підшипникових вузлів при різних дефектах підшипників (знос, викришування і ін.), дозволяє моделювати навантаження на підшипник і частоту обертання валу, а також дефекти монтажу підшипникового вузла. Вібрація перетворюється датчиком вібрації в електричний сигнал, оцифровується за допомогою аналого-цифрового перетворювача звукової карти і обробляється на ПК в середовищі Matlab, за допомогою розробленої автором програми. Програма дозволяє здійснювати фільтрацію вібросигналу, перетворення Фур'є, виділення огинаючої, визначати значення пікфактору сигналу, проводити статистичну обробку сигналу та ін.

Двоканальний багатотоновий генератор синусоїдальних і шумових сигналів звукових і інфразвукових частот призначений для налаштування і вимірювання параметрів електронно-акустичної апаратури, а також для моделювання складних коливальних процесів. Генератор складається з цифроаналогових перетворювачів (ЦАП) і програми, що управляє. Як перетворювачі використовуються двоканальні 16-, 24- або 32-бітові ЦАП стандартної звукової системи комп'ютера з допустимою частотою дискретизації (F_s) до 400 кГц.

Якість (коефіцієнт нелінійних і інтермодуляційних спотворень, точність, стабільність і діапазон частот) вихідного сигналу обмежена тільки типом використовуваного ЦАП. Синтез всіх сигналів здійснюється в реальному часі. Генератор може працювати в наступних режимах:

- генерація двох незалежних безперервних синусоїдальних сигналів з регульованим зсувом фаз між каналами;
- генерація синусоїдальних сигналів частоти, що коливається, в двох незалежних каналах з регульованою швидкістю гойдання в лінійному або логарифмічному масштабі часу;
- генерація шумів: білого (з рівномірним, трикутним або нормальним розподілом по амплітуді), рожевого ($1/f$), броунівського ($1/f^2$) в двох некорельованих каналах;
- генерація коливань пилоподібною (прямою і перевернутою), а також трикутної форми;
- генерація коливань прямокутної форми в одному або в обох каналах;
- амплітудна модуляція одного каналу іншим з регульованою глибиною;
- цифрове підсумовування двох каналів;

Три останні режими можуть бути використані одночасно з будь-яким з вище перелічених.

Додаткові можливості генератора: міжканальна синхронізація регулювання частоти; міжканальна синхронізація регулювання амплітуди; оперативне виключення і включення сигналу в одному або обох каналах без зупинки генерації; автоматична, з фіксованим кроком, зміна амплітуди або фази в межах всього діапазону регулювання (для вимірювання амплітудних або фазових залежностей).

Сигнал з акселерометра поступає в АЦП, де здійснюється часова дискретизація і квантування по рівню. Вихідним сигналом з АЦП є послідовність чисел, що поступає в цифровий процесор ПК, що виконує необхідну обробку. У цифровій формі можна створити фільтри, аналізатори спектру, нелінійне перетворення сигналу і багато що інше.

Використовуваний в дослідженнях датчик вібрації дозволяє вимірювати коливання 14 кГц. Оскільки частота Найквіста при дискретизації має бути в два або більше разів вище аналізованої частоти, в дослідженнях використана частота дискретизації – $F_s = 30$ кГц. Для видалення низькочастотних і високочастотних перешкод використовувалися ФВЧ і ФНЧ Баттерворта. Для видалення електромагнітних перешкод на частоті 50 Гц був застосований режекторний нерекурсивний фільтр 8 000 - го порядку з використанням вікна Хеммінга. Для виділення інформативних частотних смуг використаний смуговий фільтр Баттерворта. Вибір типу і порядку фільтру здійснений згідно рекомендаціям [12].

Висновки.

Розроблений пристрій для діагностування вузлів обладнання на основі спектрального аналізу дозволяє здійснити перехід в експлуатації обладнання із системи планово-попереджувальних ремонтів до ремонтів по фактичному стану, прогнозувати при цьому час та причини виходу з ладу підшипників кочення, які є одним з основних вузлів обладнання легкої промисловості, а також мати можливість застосування справних підшипників для ремонту, що в сукупності передбачає підвищення ефективності роботи підприємства на 18–20 %. Розроблений алгоритм та програмне забезпечення пристрою за результатами діагностування встановлює дійсний стан підшипника та подає інформацію в зручному вигляді, що являється основою для подальшого використання. При цьому встановлено значення діагностичних ознак для кожного дефекту та для різних класів технічного стану (від працездатного до аварійного).

Література

1. Барков А. В. Мониторинг и диагностика роторных машин по вибрации / А. В. Барков, Н. А. Баркова, А. Ю. Азовцев. – СПб: Изд. центр СПбГМТУ, 2000. – 213 с..
2. Кестер У. Аналого-цифровые преобразователи для задач цифровой обработки сигналов, в сборнике «Материалы семинара по обработке сигналов» [Электронный ресурс] / У. Кестер, Д. Брайэнт // Analog Devices, Москва. – 2002. – Режим доступа до ресурсу: <http://www.analog.com.ru/Public/2.pdf>.
3. Гетьман А. Ф. Неразрушающий контроль и безопасность эксплуатации сосудов и трубопроводов давления / А. Ф. Гетьман, Ю. Н. Козин. – М.: Энергоатомиздат, 1997. – 288 с.
4. Барков А.В. Вибрационная диагностика машин и оборудования. Анализ вибрации / Барков А.В., Баркова Н.А. СПб.: СПбГМТУ, 2004. — 156 с.
5. Ширман А. Р. Практическая вибродиагностика и мониторинг состояния механического оборудования/ Ширман А. Р., Соловьев А. Б., — М, Библиогр.1996. — 276 с.
6. Клюев В. В. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий. – М. : Машиностроение. – 1986. – 488 с.
7. Горященко К.Л. Практична реалізація опорного генератора для фазових вимірювань / К.Л. Горященко, С.Л. Горященко – Вісник ХНУ, 2016, т.4. с. 174–176.
8. Vytautas Ostasevicius, Vytautas Jurenas, Rimvydas Gaidys, Ievgeniia Golinka/ Vibroacoustic handling and levitation of microparticles in air/ JVE International Ltd. Vibroengineering PROCEDIA. Dec 2017, Vol. 15. ISSN 2345-0533 h/100-105
9. Serhiy Horyashchenko, Ievgeniia Golinka. Simulation of particle flow of the polymer droplets using ultrasonic spraying / 22th International Scientific Conference: Mechanika 2017 – Proceedings. Kaunas. P. 134–137.
6. С.Л. Горященко Моделирование краплин при розпиленні двофазного потоку соплом. Вісник ХНУ, т. 3, 2016, с. 282–285.

10 Methodology of Measuring Spraying the Droplet Flow of Polymers from Nozzle Serhiy Horiashchenko, Kostyantyn Horiashchenko, Janusz Musial /MECHANIKA, 2020 Vol 26 No 1 (2020) ISSN: 1392-1207 p.82-86 <http://mechanika.ktu.lt/index.php/Mech/article/view/23169>

11. Патент №111253 Україна, МПК (2016.01) G01R 25/00. Спосіб вимірювання фазового зсуву між періодичними сигналами довільної тривалості. Горященко К. Л., Горященко С. Л., Гула І. В., Троцишин І. В. Публікація відомостей про видачу патенту: 10.11.2016, Бюл.№ 21.

References

1. Barkov A. V. Mon'y'tory'ng y' dy'agnosty'ka rotorny'x mashy'n po vy'bracy'y' / A. V. Barkov, N. ... Barkova, A. Yu. Azovcev. – SPb: Y'zd. centr SPbGMTU, 2000. – 213 s..
2. Kester U. Analogo-cy'froye preobrazovately' dlya zadach cy'froy obrabotky' sy'gnalov, v sborny'ke «Matery'aly semy'nara po obrabotke sy'gnalov» [Elektronny'j resurs] / U. Kester, D. Brajnt // Analog Devices, Moskva. – 2002. – Rezhy'm dostupu do resursu: <http://www.analog.com.ru/Public/2.pdf>.
3. Get'man A. F. Nerazrushayushhy'j kontrol' y' bezopasnost' ekspluatatsy'y' sudov y' truboprovodov davleny'ya / A. F. Get'man, Yu. N. Kozy'n. – M.: Energoatomy'zdat, 1997. – 288 s.
4. Barkov A.V. Vy'bracy'onnyaya dy'agnosty'ka mashy'n y' oborudovany'ya. Anal'y'z vy'bracy'y' / Barkov A.V., Barkova N.A. SPb.: SPbGMTU, 2004. — 156 s.
5. Shy'rman A. R. Prakty'cheskaya vy'brody'agnosty'ka y' mon'y'tory'ng sostoyany'ya mexany'cheskogo oborudovany'ya / Shy'rman A. R., Solov'ev A. B., — M, By'bly'ogr.1996. – 276 s.
6. Klyuev V. V. Pry'borgy dlya nerazrushayushhego kontrolya matery'alov y' y'zdely'j. -M. : Mashy'nostroeny'e.- 1986.-488 s.
7. Goryashhenko K.L. Prakty'chna realizaciya opornogo generatora dlya fazovy'x vy'miryuvan' / K.L. Goryashhenko, S.L. Goryashhenko – Visny'k XNU, 2016, t.4. s. 174-176
8. Vytautas Ostasevicius, Vytautas Jurenas, Rimvydas Gaidys, Ievgeniia Golinka/ Vibroacoustic handling and levitation of microparticles in air/ JVE International Ltd. Vibroengineering PROCEDIA. Dec 2017, Vol. 15. ISSN 2345-0533 h/100-105
9. Serhiy Horyashchenko, Ievgeniia Golinka. Simulation of particle flow of the polymer droplets using ultrasonic spraying / 22th International Scientific Conference: Mechanika 2017 – Proceedings. Kaunas. P.134-137.
6. S.L. Goryashhenko Modelyuvannya kraply'n pry' rozpy'lenni dvofaznogo potoku soplom. Visny'k XNU, t.3, 2016, s 282-285
- 10 Methodology of Measuring Spraying the Droplet Flow of Polymers from Nozzle Serhiy Horiashchenko, Kostyantyn Horiashchenko, Janusz Musial /MECHANIKA, 2020 Vol 26 No 1 (2020) ISSN: 1392-1207 p. 82-86 <http://mechanika.ktu.lt/index.php/Mech/article/view/23169>
11. Patent #111253 Ukrayina, MPK (2016.01) G01R 25/00. Sposib vy'miryuvannya fazovogo zsuvu mizh periody'chny'my' sy'gnalamy' dovil'noyi try'valosti. Goryashhenko K. L., Goryashhenko S. L., Gula I. V., Trocy'shy'n I. V. Publikaciya vidomостей pro vy'dachu patentu: 10.11.2016, Byul.# 21.

Рецензія/Peer review : 05.03.2020 р.

Надрукована/Printed : 27.6.2020 р.

Стаття рецензована редакційною колегією