

АНАЛИЗ СИГНАЛОВ ВИБРАЦИИ ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

В.С. Аврамчук, В.П. Казьмин

Томский политехнический университет

E-mail: avs@tpu.ru; kvp@tpu.ru

Диагностика механизмов и систем позволяет оценить их текущее состояние и при необходимости своевременно принять меры по проведению профилактических или иных мероприятий по устранению возможных неисправностей. Диагностика механической части двигателей внутреннего сгорания, как и других механических устройств, механизмов и систем в целом, является актуальной задачей. Целью работы является исследование возможности использования частотно-временной автокорреляционной функции для анализа сигналов вибрации двигателя внутреннего сгорания с целью определения возможных нарушений в его работе. Показана принципиальная возможность определения характеристик процессов работы двигателя, сопровождающихся появлением в спектре вибросигнала двигателя дополнительных частотных составляющих. Частотно-временной корреляционный анализ позволяет получить из спектра сигналов вибрации двигателя дополнительную информацию о слабых периодических сигналах, характеризующих наличие каких-либо неисправностей его механической части.

Ключевые слова:

Цифровой сигнал, корреляционный анализ, автокорреляция, двигатель внутреннего сгорания, диагностика.

В настоящее время в большинстве случаев силовыми установками автомобилей являются двигатели внутреннего сгорания (ДВС). В них осуществляется преобразование энергии сгораемого топлива в механическую. Различают бензиновые (газовые) и дизельные двигатели. Процесс преобразования энергии в обоих типах двигателей одинаков – расширение сгораемой рабочей смеси обуславливает поступательное движение поршней в цилиндрах двигателя, которое с помощью шатунно-кривошипного механизма преобразуется во вращение коленчатого вала. С коленчатого вала снимается мощность, развиваемая двигателем.

Значительный рост числа автомобилей сопровождается не только благом для человека, но и рядом негативных последствий, в первую очередь вредными выбросами, содержащимися в отработанных газах. Это приводит к ужесточению требований к силовым установкам автомобилей. Основными мерами считаются снижение удельного расхода топлива и уменьшение выброса вредных веществ, содержащихся в выхлопных газах двигателя.

Решение указанных задач достигается как за счет совершенствования конструкции и параметров самого двигателя, так и улучшением его вспомогательных систем: подготовки и подачи рабочей смеси в цилиндры двигателя, зажигания, выпуска отработавших газов и т. п. Выполнение всевозрастающих требований достигается совершенствованием двигателя и его вспомогательных систем. Ярким примером может служить переход карбюраторных систем подготовки топливной смеси к системам впрыска топлива под компьютерным управлением.

Еще одно направление в удовлетворении возрастающих требований, предъявляемых к ДВС, – поддержание установленных технических характеристик двигателей, которое достигается его регламентным обслуживанием и диагностикой. Важность и эффективность последней меры обусловила разработку значительного числа различных методов, приборных средств, аппаратно-про-

граммных комплексов, направленных на выявление отказов или приближения к ним. Последние получили общее название «Мотор-тестеров» [1, 2]. Еще один шаг в этом же направлении – наличие встроенных в бортовой компьютер автомобиля диагностических программ, осуществляющих постоянный контроль основных параметров двигателя. При обнаружении отклонения какого-либо параметра от допустимых значений осуществляется сигнализация с помощью средств самодиагностики автомобиля (Check-Engine). Понятно, что бортовая диагностика не может обнаружить все возможные неисправности систем управления и двигателя. Это относится в первую очередь к неисправностям механических узлов. Поэтому необходимы более полные методы и средства диагностики, ориентированные на стационарное использование в условиях станций обслуживания [3]. В любых условиях одной из наиболее важных задач является диагностика состояния цилиндропоршневой группы (ЦПГ) [4].

В этом отношении перспективным и эффективным способом технической диагностики двигателя может оказаться частотный анализ [5, 6]. Действительно, в спектре сигнала, получаемого с любой точки двигателя, содержится информация обо всех источниках вибрации. Однако в настоящее время анализ таких сигналов затруднен, а часто невозможен из-за высокого уровня шумов, обусловленных особенностью работы двигателей [7]. Источников вибрации много: вращающиеся механизмы с узлами возвратно-поступательного действия, изменения направления движения рабочих узлов, изменяющаяся сила трения, зависящая от угла поворота узлов вращения, импульсный характер подачи и воспламенения смеси в цилиндрах и др. [8]. Они значительно усложняют анализ и интерпретацию сигналов. Поиск решений в этом направлении связан с улучшением отношения сигнал/шум и совершенствованием интерпретации получаемых сигналов на основе их обработки.

Развитые методы современной цифровой обработки сигналов позволяют значительно повысить точность решения разнообразных задач частотного анализа. В рамках таких исследований имеется направление, которое, как полагают, может привести к значительному повышению точности [9]. Подход основан на разбиении всего частотного диапазона на ряд участков, что позволяет вести обработку полного сигнала по отдельным его частям. Этот подход в сочетании с классическим корреляционным анализом позволяет улучшить отношение сигнал/шум в выделенном частотном диапазоне [10, С. 194]. В приложении к интересующей нас задаче анализа частотного спектра диагностического сигнала двигателя это дает возможность выделить слабый периодический сигнал на фоне интенсивных помех и определить его частоту [10, 11].

Рассмотрим представленный подход более подробно. Для анализа сигнала следует получить автокорреляционную функцию, используя преобразование Фурье, по выражению [12]

$$K(\tau) = F^{-1}[F(x_i)F^*(x_i)],$$

где F – прямое дискретное преобразование Фурье сигнала x_i , F^* – комплексно-сопряженное значение результатов прямого дискретного преобразования, F^{-1} – обратное дискретное преобразование Фурье. Согласно [11] перед вычислением произведения $F(x_i)F^*(x_i)$ предварительно формируют m его копий M^k , $k=0, \dots, m-1$, обнуляя весь спектр, кроме k -й части. Результатом обратного преобразования Фурье каждой из этих копий является автокорреляционная функция на соответствующих участках. Таким образом, определяется так называемая частотно-временная автокорреляционная функция [11]. Формульная запись имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} K(f_k, t_i) &= Z_i^k, \\ Z^k &= F^{-1}[M^k], \\ M_j^k &= \begin{cases} P_j, & \frac{k}{m} \leq \frac{j}{2^{n-1}+1} < \frac{k+1}{m}, \\ 0, & \text{иначе,} \end{cases} \\ P_j &= F(x_i)F^*(y_i), \end{aligned}$$

где x_i – дискретные отсчеты анализируемого сигнала, $i=0, 1, \dots, 2^n-1$, $j=0, 1, \dots, 2^{n-1}+1$, $k=0, 1, \dots, m-1$, $m=1, 2, \dots, 2^{n-1}$, $n=2, 3, \dots$

Результаты расчета частотно-временной корреляционной функции могут быть представлены сложным вектором Z^k ($=0, 1, 2, \dots, m-1$), где m – количество частотных диапазонов, каждый элемент которого представляет собой корреляционную функцию анализируемого частотного диапазона.

Для экспериментальной проверки возможности применения этого подхода к диагностике ДВС был осуществлен эксперимент на двигателе ВАЗ-2101. Задача заключалась в возможности определения периодических сигналов, вызванных какой-то причиной. Такой причиной может быть неисправность двигателя. Однако более значимым будет какая-

либо регулярная основа, например вибрация, вызванная вращением коленчатого вала. В этом случае обеспечивается простота проверки частоты вращения с помощью тахометра, что дает возможность иметь «точное» решение, с которым можно сравнивать расчетное (экспериментальное) значение параметра, полученное по диагностическому сигналу. Такой сигнал, подлежащий частотно-временному корреляционному анализу, был получен с помощью вибропреобразователя ДН-3, который в двух проведенных опытах располагался соответственно в окрестностях цилиндров 1 и 4. Запись сигналов вибрации осуществлялась на портативном компьютере с интегрированным звуковым адаптером. Частота дискретизации сигнала была принята типовой и составляла 44100 Гц. Отметим, что такие адаптеры не являются лучшими, так как имеют сравнительно высокий уровень собственных шумов. Размер выборки для быстрого преобразования Фурье был определен в 32768 отсчета, интервал разбиения спектра составлял 500 Гц.

Результаты эксперимента показаны на рис. 1–3. Там приведены графики соответственно исходного сигнала, его автокорреляционной функции и частотно-временной автокорреляционной функции, полученные для первого цилиндра.

По виду автокорреляционной функции можно предположить, что периодические сигналы существуют. Предполагаемые варианты на рис. 2 отмечены стрелками. Однако достоверность вывода невысока. И уж относительно значений этих частот делать выводы еще более затруднительно, т. к. ошибка может оказаться непредсказуемой. Причина затруднений понятна – велик уровень помех. Поэтому обработка диагностического сигнала должна вестись целевым образом – на основе снижения влияния шумов.

Рассмотрим возможность решения этой задачи по частотно-временной автокорреляционной функции, которая по своей сути соответствует условию снижения уровня помех. Такая функция получена по описанному выше алгоритму и представлена на рис. 3: максимальные значения отображены черным цветом, минимальные – белым, а промежуточные значения – в градациях серого цвета. По приведенным экспериментальным результатам время одного оборота коленчатого вала составило $T_{об} \approx 38$ мс. Следовательно, количество оборотов коленчатого вала в минуту будет примерно равно 1579 об/мин. Для сравнения: частота вращения вала по показаниям тахометра автомобиля примерно равнялась 1500 об/мин.

Полученный расчетный результат можно считать удовлетворительным, так как установлена возможность использования вибросигнала ДВС для выявления периодических составляющих сигналов, имеющих шумовые помехи на уровне, не позволяющем выявить их традиционными средствами. В то же время существует погрешность, источники которой нужно выявлять и парировать.

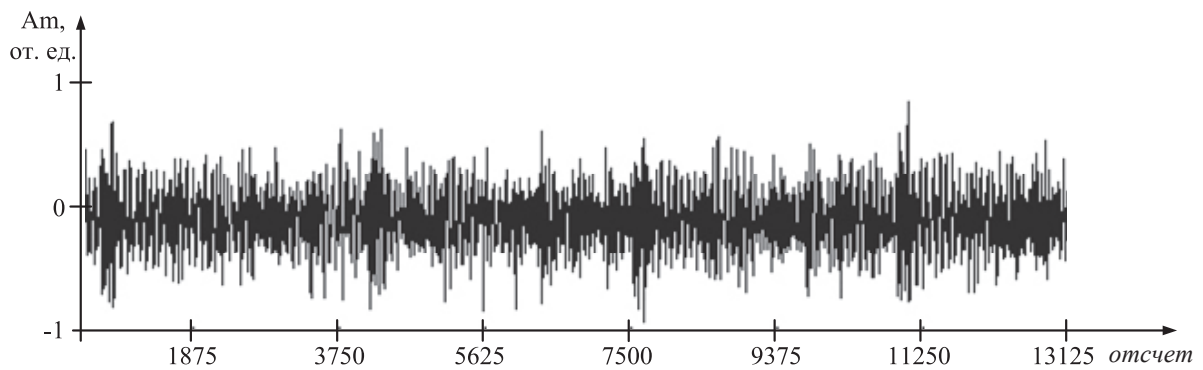


Рис. 1. Нормированный сигнал с выхода вибропреобразователя в окрестности первого цилиндра

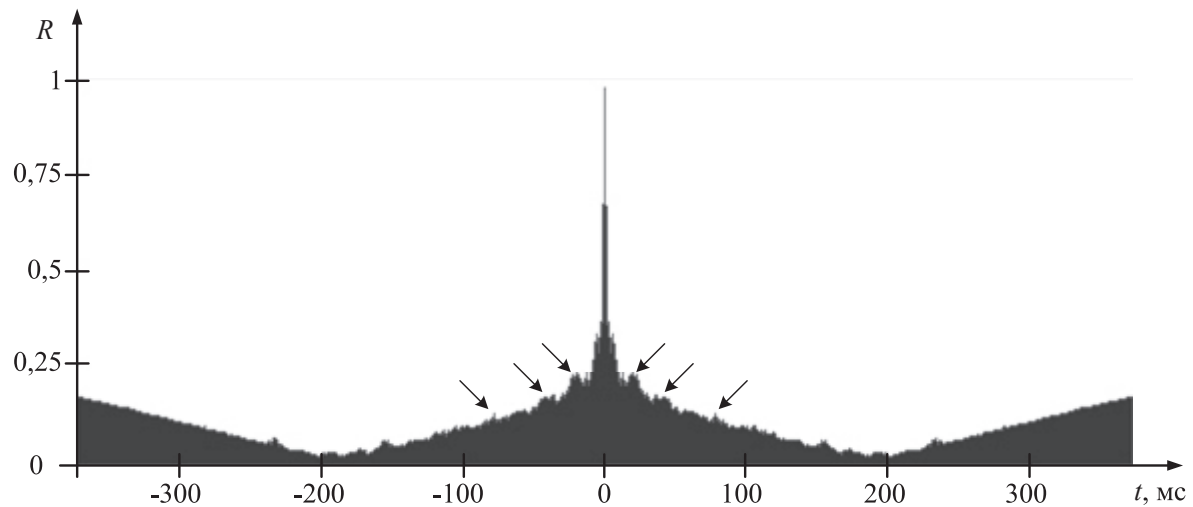


Рис. 2. Автокорреляционная функция анализируемого сигнала

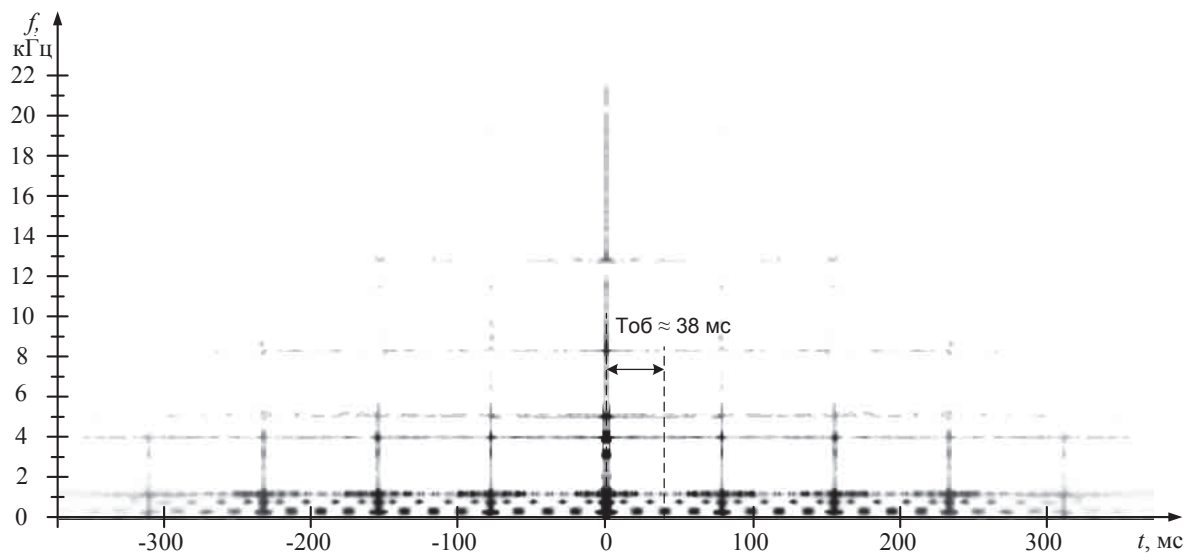


Рис. 3. Частотно-временная автокорреляционная функция анализируемого сигнала

По содержанию и форме графика на рис. 3 добавим: на мониторе такие функции имеют цветные изображения, что обеспечивает их большую информационную насыщенность. Та же функция, по-

казанная на рис. 3 в чёрно-белом изображении, имеет значительно меньшую разрешающую способность и, следовательно, существенно большую погрешность по сравнению с экраным предста-

влении. На этом основании можно утверждать, что существуют причины, устранение которых приведет к повышению точности определения периодических составляющих, вызванных, в частности, зазорами в сопрягающихся движущихся частях и другими источниками колебаний. В данном эксперименте необходимо было показать принципиальную возможность выделения таких составляющих и определения их частот. Эта задача выполнена.

Анализ полученных графиков позволяет сделать вывод о том, что частотно-временная автокорреляционная функция позволяет определить не только слабые периодические сигналы, но и наличие сигналов импульсного характера (периодически возникающие источники), определить период их возникновения и их частотные диапазоны. Совместное использование результатов спектрального и частотно-временного автокорреляционного анализа позволяет выделить частотные диапазоны, в которых присутствует полезный сигнал, при необходимости настроить параметры частотных фильтров и произвести фильтрацию сигнала, а также определить гармонические составляющие, соответствующие процессам работы двигателя, например моментам воспламенения топлива в цилиндре.

Для более подробного исследования сигналов вибрации ДВС можно увеличить количество разбиений частотного спектра (уменьшить интервал разбиения спектра) и получить более полное представление о частотных свойствах сигнала. Однако при уменьшении интервала разбиения исследуемого спектра возрастает количество вычислительных процедур преобразований Фурье, что накладывает дополнительные требования к вычислительным мощностям ЭВМ или требует применения специализированных вычислительных технологий. Эти вопросы рассмотрены в [13, 14], там же предложены пути решения этой проблемы. Так что принципиальных препятствий на этом пути пока нет.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пахомов А.А. Применение мотортестера «MotoDос II» в диагностике отечественных автомобилей. 2007. URL: http://www.chiptuner.ru/content/pub_08 (дата обращения: 10.03.2012).
2. ООО НПП «АСЕ». Оборудование для профессиональной автомобильной диагностики. URL: http://www.ace-lab.ru/dep-auto/?u_tm_source=YDirect&utm_medium=cpc&utm_term=motor_tester&utm_campaign=RFnetwork (дата обращения: 20.02.2013).
3. Кюрегян С.К. Оценка износа двигателей внутреннего сгорания методом спектрального анализа. – М.: Машиностроение, 1966. – 153 с.
4. Повреждения поршней – как выявить и устранить их. – Асперг: Kolbenschmidt Pierburg Group, 2006. – 104 с.
5. Костюков В.Н., Науменко А.П. Практические основы виброакустической диагностики машинного оборудования. – Омск: ОмГТУ, 2002. – 108 с.
6. Науменко А.П. Методология виброакустической диагностики поршневых машин // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Специальный выпуск. Серия Машиностроение. – 2007. – С. 85–95.

Выводы

В работе показана принципиальная возможность использования частотно-временной автокорреляционной функции для выявления периодически возникающих сигналов, определения периода их возникновения и частотных диапазонов, соответствующих этим сигналам. Наличие слабых гармонических составляющих в анализируемом сигнале определяется по полученной частотно-временной автокорреляционной функции и сводится к выделению на графике соответствующих линий и определению значений частот, относящихся к ним.

Использование частотно-временного корреляционного подхода при исследовании сигналов вибрации ДВС позволяет получать характеристики и показатели, отражающие, в частности, состояние механической части двигателя. Задачу диагностики можно ставить шире, анализируя также состояние и работоспособность вспомогательных систем двигателя, таких как системы зажигания, впрыска и т. д. Такие испытания можно делать для различных режимов работы двигателя, расширяя функциональные возможности подхода и диагностической аппаратуры на ее основе. В частности, важной задачей в диагностике рассматриваемых объектов является определение отклонений в работе газораспределительном механизме. В то же время эта задача интересна с позиций исследований ДВС. Дело в том, что частоты вращения коленчатого вала и вала газораспределительного механизма кратны и это делает совпадающими информационные линии на графиках рис. 3. Расшифровать такую картину оказывается непросто, но в случае положительного результата расширяются возможности анализа этой системы двигателя.

Таким образом, применение рассмотренной автокорреляционной функции расширяет область применения математического аппарата корреляционного анализа при исследовании сложных процессов, характеризующихся сигналами полигармонического и импульсного характера.

7. McKinnon I. Update International, Inc. Практический подход к анализу состояния машин возвратно-поступательного действия / пер. с англ. И.Р. Шейняка, под ред. канд. техн. наук В.А. Смирнова // Вибродиагностика для начинающих и специалистов. URL: http://www.vibration.ru/analiz_mashin.shtml (дата обращения: 10.05.2010).
8. Тольский В.Е., Корчемный Л.В., Латышев Г.В., Минкин Л.М. Колебания силового агрегата автомобиля. – М.: Машиностроение, 1976. – 266 с.
9. Аврамчук В.С., Гончаров В.И., Чан Вьет Тъяу. Частотно-временной корреляционный анализ в задачах определения координат утечек в трубопроводах // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 317. – № 2. – С. 70–73.
10. Макс Ж. Методы и техника обработки сигналов при физических измерениях: в 2-х т. Пер. с франц. – М.: Мир, 1983. – Т. 1. – 312 с.
11. Аврамчук В.С. Определение наличия гармонических составляющих и их частот в дискретных сигналах на основе автокорреляционной функции // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 321. – № 5. – С. 113–116.

12. Айфичер Э.С., Джервис Б.У. Цифровая обработка сигналов: практический подход. – М.: Вильямс, 2008. – 992 с.
13. Лунова Е.Е., Аврамчук В.С. Технологии параллельных вычислений на многопроцессорных системах в задачах корреляционного анализа // Системы управления и информационные технологии. – 2012. – № 3.1 (49). – С. 156–159.
14. Аврамчук В.С., Лунова Е.Е., Черемнов А. Г. Способы повышения эффективности вычисления быстрого преобразования Фурье // Наукоедение. – 2013 – № 3. – С. 1–6. URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/16tvn313.pdf> (дата обращения: 15.06.2013).

Поступила 09.07.2013 г.

UDC 519.6:004.93

ANALYSIS OF VIBRATION SIGNALS OF COMBUSTION ENGINE

V.S. Avramchuk, V.P. Kazmin

Tomsk Polytechnic University

Diagnostics of mechanisms and systems allows estimating their current state and taking measures if necessary to carry out preventive or other actions for elimination of possible malfunctions. Diagnostics of mechanical part of combustion engines, as well as other mechanical devices, mechanisms and systems as a whole, is the relevant objective. The purpose of the paper is the research of possible use of frequency-time autocorrelated function to analyze the combustion engine vibration signals for determining possible defects in its work. The paper introduces the basic possible definition of characteristics of engine operation processes, being accompanied by emergence of additional frequency components in a spectrum of engine vibrosignal. The frequency-time correlation analysis allows receiving out of spectrum of engine vibrosignal additional information on weak periodic signals characterizing existence of any malfunctions of its mechanical part.

Key words:

Digital signal, correlation analysis, autocorrelation, combustion engine, diagnostics.

REFERENCES

1. Pakhomov A.A. *Primenenie motortestera «MotoDoc II» v diagnostike otechestvennykh avtomobiley avtomobiley* [Application of motortester «MotoDoc II» in diagnostics of Russian automobiles]. 2007. Available at: http://www.chiptuner.ru/content/pub_08 (accessed 10 March 2012).
2. ООО NPP «ASE». *Oborudovanie dlya professionalnoy avtomobilnoy diagnostiki* [Equipment for professional automobile diagnostics]. Available at: http://www.acelab.ru/dep.auto/?utm_source=YDirect&utm_medium=cpc&utm_term=motor_tester&utm_campaign=RFnetwork (accessed 20 February 2013).
3. Kyuregyan S.K. *Otsenka iznosa dvigateley vnutrennego sgoraniya metodom spektralnogo analiza* [Evaluation of combustion engines wear by the spectral analysis method]. Moscow, Mashinostroenie, 1966. 153 p.
4. *Povrezhdeniya porshnej porshney kak vyyavit i ustranit ikh* [Damages of bucket – how to reveal and eliminate them]. Asperg, Kolbenschmidt Pierburg Group, 2006. 104 p.
5. Kostyukov V.N., Naumenko A.P. *Prakticheskie osnovy vibroakusticheskoy diagnostiki mashinnogo oborudovaniya* [Practical bases of vibroacoustic diagnostics of the machine equipment]. Omsk, OmGTU, 2002. 108 p.
6. Naumenko A.P. *Metodologiya vibroakusticheskoy diagnostiki porshnevykh mashin* [Methodology of vibroacoustic diagnostics of bucket cars]. *Bulletin of MGTU after N.E. Bauman. Special edition. Series Mashinostroenie*, 2007. pp. 85–95.
7. McKinnon I. Update International, Inc. *Prakticheskiy podkhod k analizu sostoyaniya mashin vozvratno-postupatel'nogo deystviya* [The practical approach to the analysis of the condition of reciprocating action machines]. Translation into English by I.R. Sheynyak. *Vibrodiagnostika dlya nachinayushchikh i spetsialistov*. [Vibrodiagnostics for beginners and specialists]. Available at: http://www.vibration.ru/analiz_mashin.shtml (accessed 10 May 2010).
8. Tolskiy V.E., Korchemny L.V., Latyshev G.V., Minkin L.M. *Kolebaniya silovogo agregata avtomobilya* [Fluctuations of the power unit of the automobile]. Moscow, Mashinostroenie, 1976. 266 p.
9. Avramchuk V.S., Goncharov V.I., Chan Vet Tyau. *Chastotno-vremennoy korrelyatsionnyy analiz v zadachakh opredeleniya koordinat utechek v truboprovodakh* [The frequency-time correlation analysis in problems of determination of coordinates of leaks in pipelines]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2010, vol. 317, no. 2, pp. 70–73.
10. Maks Zh. *Metody i tekhnika obrabotki signalov pri fizicheskikh izmereniyakh* [Methods and techniques for signals processing at physical measurements]. Translation from French. Moscow, Mir, 1983. Vol. 1, 312 p.
11. Avramchuk V.S. *Opreделение nalitya garmonicheskikh sostavlyayushchikh i ikh chastot v diskretnykh signalakh na osnove avtokorrelyatsionnoy funktsii* [Definition of existence of harmonic components and their frequencies in discrete signals on the basis of autocorrelation function]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2012, vol. 321, no. 5, pp. 113–116.
12. Ayficher Je.C., Dzhervis B.U. *Cifrovaya Tsifrovaya obrabotka signalov: prakticheskiy podkhod* [Digital signal processing: practical approach]. Moscow, Williams, 2008. 992 p.
13. Luneva E.E., Avramchuk V.S. *Tekhnologii parallelnykh vychisleniy na mnogoprotsessornykh sistemakh v zadachakh korrelyatsionnogo analiza* [Technologies of parallel calculations on the multiprocessor systems in tasks of the correlation analysis]. *Control systems and information technologies*, 2012, no. 3.1 (49), pp. 156–159.
14. Avramchuk V.S., Luneva E.E., Cheremnov A. G. *Sposoby povysheniya effektivnosti vychisleniya bystrogo preobrazovaniya Furie* [Ways of efficiency increase of calculation of fast Fourier transformation]. *Naukovedenie*, 2013, no. 3. pp. 1–6. Available at: <http://naukovedenie.ru/PDF/16tvn313.pdf> (accessed 15 June 2013).