

В. Н. Якимов, д-р техн. наук, проф., vnr@hotmail.com, В. И. Батищев, д-р техн. наук, проф., vib@list.ru,
А. В. Машков, ст. преподаватель, mavstu@list.ru,
Самарский государственный технический университет, г. Самара

Цифровой анализ амплитудного спектра вибрационных сигналов на основе Фурье-обработки результата бинарно-знакового аналого-стохастического квантования¹

Рассматривается задача разработки цифрового алгоритма для оперативного гармонического анализа сложных по составу вибрационных сигналов. Основой решения данной задачи стало обобщенное уравнение статистических измерений, которое определяет измерительную процедуру как последовательное выполнение взаимосвязанных измерительных и вычислительных преобразований. В процессе разработки алгоритма особое внимание уделено аналого-цифровому преобразованию, поскольку оно непосредственно влияет на вычислительную эффективность цифровых процедур получения конечного результата. В качестве такого преобразования обосновано применение бинарно-знакового аналого-стохастического квантования, которое позволяет выполнять двухуровневое квантование без систематической погрешности независимо от статистических свойств анализируемых сигналов. Дискретно-событийная модель результата бинарно-знакового аналого-стохастического квантования позволила осуществить аналитическое вычисление операций интегрирования при переходе к оценке амплитудного спектра в цифровом виде. Как следствие, разработанный алгоритм гармонического анализа не требует выполнения операций цифрового умножения, характерных для классических алгоритмов, которые основаны на вычислении прямого дискретного преобразования Фурье. Выполнение алгоритма сводится к реализации арифметических операций сложения и вычитания значений косинусоидальной функции в моменты времени, определяемые результатом бинарно-знакового аналого-стохастического квантования. Исключение операций цифрового умножения обеспечило повышение вычислительной эффективности оценивания амплитудного спектра. Лабораторные исследования разработанного алгоритма проводились с использованием имитационного моделирования. Результаты моделирования показали, что алгоритм позволяет вычислять оценки амплитудного спектра сложных сигналов с высокой точностью и частотным разрешением при наличии аддитивного шума. В реальных условиях апробация разработанного алгоритма была проведена при стендовых исследованиях эксплуатационного состояния автобуса МАЗ-206067, предназначенного для перевозки пассажиров на городских и пригородных маршрутах средней загруженности. Анализ результатов экспериментальных исследований подтвердил возможность использования алгоритма в составе диагностического обеспечения для оперативного мониторинга вибрационных сигналов в условиях сложной шумовой обстановки.

Ключевые слова: гармонический анализ, амплитудный спектр, бинарно-знаковое аналого-стохастическое квантование, цифровой алгоритм, диагностическое обеспечение

Введение

Работа вращающихся машин и механизмов сопровождается механическими вибрациями. Бесконтрольное развитие процессов вибрации может привести к необратимым дефектам и стать причиной частичного или полного нарушения нормального режима эксплуатации технических объектов. В зависимости от способов механического соединения и динамического взаимодействия деталей и узлов большая часть дефектов проявляет себя в виде распределенной совокупности гармонических составляющих в амплитудном спектре вибрационных сигналов. При этом каждому источнику механической вибрации будут соответствовать определенные спектральные составляющие. Вследствие этого диагностика зарождающихся дефектов и предупреждение их развития на

ранней стадии приводит к необходимости постоянного мониторинга спектрального состава вибрационных сигналов в широком диапазоне частот на рабочих режимах функционирования объектов диагностики [1–6].

Анализ спектрального состава вибрационных сигналов осуществляется с использованием диагностического обеспечения, которое представляет собой комплекс взаимосвязанных правил, методов, алгоритмов и средств, необходимых для диагностирования работы объекта на всех этапах его жизненного цикла [7]. Основу диагностического обеспечения составляют методы и средства спектрального анализа. Реальные механические вибрации представляют собой сложные многокомпонентные колебательные процессы, которые обладают свойством повторяемости через определенные интервалы времени [8]. Одним из наиболее эффективных методов анализа спектрального состава таких сигналов является гармонический анализ Фурье [9]. Данный вид анализа позволяет разложить сигнал вместе с присутствующим в нем шумом по гармоническим функциям и обеспечивает иденти-

¹Статья подготовлена при финансовой поддержке РФФИ в рамках выполнения научных проектов № 19-08-00228-А и № 18-08-00253-А.

фикацию спектральных составляющих в широком диапазоне частот [10—12].

Интенсивное развитие вычислительной техники привело к тому, что в настоящее время гармонический анализ преимущественно осуществляется в цифровом виде с использованием программных средств. Переход к цифровым методам гармонического анализа объясняется улучшением разрешения по частоте и повышением способности обнаруживать слабые гармонические составляющие. Однако непрерывное развитие и возрастающая сложность производственных процессов приводят к необходимости постоянного повышения ресурсной и временной эффективности средств цифрового гармонического анализа. Решение данной задачи приобретает особое значение, когда требуется оперативное установление наличия неисправностей в условиях экстремального режима работы объекта диагностики [9].

Постановка задачи

Проблему повышения эффективности цифровой обработки сигналов традиционно решают с использованием двух подходов к организации вычислительных процедур: во-первых, за счет улучшения схемотехнических решений и повышения общей производительности вычислительных средств, во-вторых, путем подготовки исходных данных в виде упорядоченных алгебраических структур и оптимизации программного кода [13—19]. Однако данная проблема не может быть успешно решена только за счет возрастающей мощности вычислительной техники и использования структурно-организационного подхода к реализации вычислительных процедур. Это объясняется тем, что временные характеристики программных средств во многом определяются математической моделью вычислительного процесса и выбором алгоритмических решений и конструкций ее практической реализации [20]. Поэтому разработка математического обеспечения и синтез на его основе алгоритмического обеспечения, приводящего к снижению системных издержек и повышению вычислительной эффективности программных средств гармонического анализа, являются актуальной задачей.

Цифровая обработка сигналов осуществляется в соответствии с заданным вычислительным алгоритмом и предполагает предварительное формирование исходного массива дискретных данных. Обычно в процессе разработки вычислительных алгоритмов преобразование сигналов в цифровую форму рассматривается как предопределенная вынуж-

денная процедура. При этом априори считают, что подлежащие цифровой обработке массивы отсчетов анализируемого сигнала формируются с использованием классического аналого-цифрового преобразования. Суть такого преобразования состоит в том, что цифровой код мгновенных значений непрерывного аналогового сигнала получают в результате выполнения операций равномерной дискретизации во времени и многоуровневого квантования.

Одним из важнейших требований, предъявляемых к аналого-цифровому преобразованию, является обеспечение необходимой точности представления сигналов в цифровом виде в пределах динамического диапазона изменения их значений [9]. В цифровых системах существенное влияние на значение динамического диапазона оказывают эффекты квантования сигнала по уровню. Динамический диапазон может быть уменьшен при наличии любых факторов, искажающих результат квантования сигнала. Обычно в целях обеспечения требуемой точности оцифровки сигнала увеличивают число уровней квантования. Это приводит к тому, что классические цифровые алгоритмы гармонического анализа методом дискретного преобразования Фурье приводят к необходимости выполнения существенного числа многоразрядных операций умножения, что требует значительных временных затрат. При этом с увеличением разрядности цифровых отсчетов сигнала или размерности дискретного преобразования Фурье эти затраты возрастают. Поэтому перспективным подходом к решению задачи разработки эффективных в вычислительном отношении программных средств для гармонического анализа является уменьшение общего числа операций цифрового умножения и алгоритмические способы ускорения их выполнения.

Разработка алгоритма гармонического анализа с использованием бинарно-знакового аналого-стохастического квантования

Основой решения поставленной задачи стала концепция обобщенного уравнения статистических измерений. Это уравнение определяет процедуру измерения вероятностных характеристик в операторной форме, и его можно рассматривать как первый этап построения алгоритмического базиса процедур вычисления цифровых оценок [21, 22].

Согласно обобщенному уравнению статистических измерений алгоритм оценивания любой вероятностной характеристики можно однозначно представить как выполнение в определенной последовательности совокупности взаимосвязанных измерительных и вычислитель-

ных преобразований. Естественно, что в случае цифровых алгоритмов обязательным является преобразование сигналов в цифровую форму. В рамках обобщенного уравнения статистических измерений данный вид преобразования можно рассматривать как предварительную обработку анализируемого сигнала, которая непосредственно влияет на вычислительную сложность последующих цифровых процедур, осуществляемых в процессе получения конечного результата. Следовательно, разработать экономичный в вычислительном отношении цифровой алгоритм гармонического анализа можно за счет выбора такого метода дискретного представления сигналов, который позволил бы упростить цифровую обработку сигналов. Исходя из этого в качестве аналого-цифрового преобразования сигналов предлагается использовать бинарно-знаковое аналого-стохастическое квантование. Такое квантование позволяет осуществлять двухуровневое квантование без систематической погрешности независимо от статистических свойств анализируемых сигналов [22—25]. Математически результат бинарно-знакового аналого-стохастического квантования можно записать в следующем виде:

$$z(t) = \begin{cases} -1, & x(t) + \xi(t) < 0; \\ +1, & x(t) + \xi(t) \geq 0, \end{cases}$$

где $x(t)$ — наблюдаемая реализация анализируемого сигнала $X(t)$; $\xi(t)$ — вспомогательный случайный сигнал.

Вспомогательный случайный сигнал $\xi(t)$ выполняет функцию стохастического порога квантования. Он имеет равномерное распределение и принимает значения в пределах интервала с нижней границей $-\xi_{\max}$ и верхней границей $+\xi_{\max}$, где значение величины ξ_{\max} должно быть больше максимально возможного по модулю значения квантуемой реализации $x(t)$.

Сущность гармонического анализа Фурье состоит в представлении сигналов в виде суммы гармонических составляющих, которые образуют амплитудный спектр. В соответствии с этим математическая модель центрированного (т. е. без постоянной составляющей) сигнала может быть записана следующим образом:

$$\overset{o}{X}(t) = \sum_{k=1}^K \alpha_k \cos(2\pi f_k t + \varphi_k) + e(t),$$

$$\alpha_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2} \text{ и } f_k = kf_0,$$

где α_k , φ_k и f_0 — соответственно амплитуды, начальные фазы и основная частота гармонических составляющих; a_k и b_k — коэффициенты

ряда Фурье; $e(t)$ — статистически независимый по отношению к сигналу аддитивный широкополосный шум с нулевым математическим ожиданием.

Пусть гармонический анализ сигнала $\overset{o}{X}(t)$ осуществляется на интервале времени длительностью T . В пределах этого интервала времени с учетом выполнения бинарно-знакового аналого-стохастического квантования оценки коэффициентов ряда Фурье будем искать в следующем виде [26—31]:

$$\hat{a}_k = \lambda \Delta f \int_0^T z(t) \cos 2\pi k \Delta f t dt;$$

$$\hat{b}_k = \lambda \Delta f \int_0^T z(t) \sin 2\pi k \Delta f t dt,$$

где $\lambda = 2\xi_{\max}$; $\Delta f = 1/T$ — предельное разрешение по частоте.

Тогда имеем:

$$\hat{\alpha}_k^2 = \lambda^2 \Delta f^2 \int_0^T z(t_1) \int_0^T z(t_2) \cos 2\pi k \Delta f (t_2 - t_1) dt_1 dt_2. \quad (1)$$

Результат бинарно-знакового аналого-стохастического квантования $z(t)$ принимает значения, равные только -1 и $+1$. Поэтому согласно теории дискретно-событийного моделирования его можно представить во времени как дискретную последовательность событий, где каждому событию соответствует смена его значения [32]. С учетом такой модели результат бинарного знакового аналого-стохастического квантования на интервале времени $t \in [0; T]$ можно однозначно представить в виде его начального значения $z(t_0)$ и множества отсчетов времени $\{t_i^z : 1 \leq i \leq I-1\}$, в которые он последовательно меняет свое значение [23, 26—31]. При этом $t_0 = 0$ и $t_I^z = T$. Исходя из этого оценку (1) представим в виде суммы интегралов:

$$\hat{\alpha}_k^2 = \lambda^2 \Delta f^2 \sum_{i=0}^{I-1} (-1)^i \sum_{j=0}^{I-1} (-1)^j \times$$

$$\times \int_{t_i^z}^{t_{i+1}^z} \int_{t_j^z}^{t_{j+1}^z} \cos 2\pi k \Delta f (t_2 - t_1) dt_1 dt_2. \quad (2)$$

В соотношении (2) интегралы по переменным t_1 и t_2 вычисляются аналитически. После их вычисления получим:

$$\hat{\alpha}_k^2 = A_k^2 \left(C + \sum_{i=h}^{I-2} (-1)^i \sum_{j=i+1}^{I-1} (-1)^j \cos 2\pi k \Delta f \Delta \tau_{j,i} \right); \quad (3)$$

$$A_k = \lambda \sqrt{2}/\pi k, \Delta \tau_{j,i} = t_j^z - t_i^z, C = (I-h)/2,$$

где $h = 0$, если I — четное, и $h = 1$, если I — нечетное.

В выражении (3) изменим порядок суммирования. Тогда оценка $\hat{\alpha}_k^2$ примет вид

$$\hat{\alpha}_k^2 = A_k^2 \left(C + \sum_{j=1}^{I-1-h} (-1)^j D_{k,j} \right); \quad (4)$$

$$D_{k,j} = \sum_{i=h}^{I-j-1} \cos 2\pi k \Delta f \Delta \tau_{j+i,i}. \quad (5)$$

Для того чтобы получить алгоритм вычисления оценки $\hat{\alpha}_k^2$ в цифровой форме в формуле (5) перейдем к числовому представлению множества отсчетов времени $\{t_i^z: 1 \leq i \leq I-1\}$. Это можно сделать, если использовать классический подход к цифровому представлению интервалов времени. Согласно этому подходу $t_i^z = \eta_i^z \Delta t$, где Δt — период следования счетных импульсов. Тогда будем иметь множество целых чисел $\{\eta_i^z, 1 \leq i \leq I-1\}$. Отметим, что $\eta_0^z = 0$. Время анализа будет равно $T = N\Delta t$. Следовательно, $\eta_I^z = N$. В результате для выражения (5) получаем:

$$D_{k,j} = \sum_{i=h}^{I-j-1} \cos 2\pi k N^{-1} \Delta \eta_{j+i,i}, \quad (6)$$

где $\Delta \eta_{j+i,i} = \eta_{j+i}^z - \eta_i^z$.

Соотношения (4) и (6) определяют процедуру вычисления оценок амплитуд $\hat{\alpha}_k$ гармонических составляющих на дискретных частотах $f_k = k\Delta f$ с разрешением по частоте $\Delta f = (N\Delta t)^{-1}$. На основе этих соотношений разработан цифровой алгоритм оценивания амплитудного спектра. Ниже представлена краткая последовательность выполнения основных действий, определяемых этим алгоритмом.

1. На интервале времени $t \in [0; T]$ формируется $z(t)$.

2. Определяются отсчеты времени $\{\eta_i^z, 1 \leq i \leq I-1\}$; $\eta_0^z = 0$; $\eta_I^z = N$.

3. $B = 2\xi_{\max} \text{SQRT}(2)/\pi$; $\Omega = 2\pi/N$.

4. $C = I/2$, если I — четное, иначе $C = (I-1)/2$.

5. Для $k = 1, 2, 3, \dots, K$ выполняются действия:

5.1. $A_k = B/k$; $G_k = C$; $\omega_k = \Omega k$.

5.2. Для $j = 1, 2, 3, \dots, (I-1-h)$ выполняются действия:

5.2.1. $D_{k,j} = 0$.

5.2.1.1. Для $i = h, \dots, (I-j-1)$ выполняются действия:

$$\Delta \eta_{j+i,i} = \eta_{j+i}^z - \eta_i^z; D_{k,j} = D_{k,j} + \cos \omega_k \Delta \eta_{j+i,i}.$$

5.2.2. $G_k = G_k + (-1)^j D_{k,j}$.

5.3. $\hat{\alpha}_k = A_k \text{SQRT}(G_k)$.

6. Вывод результатов $\hat{\alpha}_k$ для $k = 1, 2, 3, \dots, K$.

В отличие от существующих классических алгоритмов гармонического анализа, основан-

ных на вычислении прямого дискретного преобразования Фурье, разработанный алгоритм практически не требует выполнения многоразрядных операций цифрового умножения. Нетрудно видеть, что его выполнение сводится в основном к реализации арифметических операций сложения и вычитания отсчетов косинусоидальной функции $\cos 2\pi k N^{-1} \Delta \eta_{j+i,i}$. Такой результат обеспечивает повышение вычислительной эффективности оценивания амплитудного спектра сложных сигналов. Полученный алгоритм послужил основой для разработки специализированного программного модуля, который может быть использован в составе диагностического обеспечения для комплексного мониторинга вибрационного состояния различных по назначению и составу технических объектов.

Результаты экспериментальных исследований

Экспериментальные исследования алгоритма проводились с использованием имитационного моделирования выполнения процедуры бинарно-знакового аналого-стохастического квантования. Для этого был разработан специализированный программный модуль формирования множества отсчетов времени $\{\eta_i^z, 1 \leq i \leq I-1\}$.

В лабораторных условиях модель централизованной реализации анализируемого сигнала представляла собой аддитивную смесь гармонических составляющих с нормированными частотами $f_k^H \in [0; 0,5]$ и амплитудами $\alpha_k \in [0; 1]$. Начальные фазы φ_k задавались равномерно распределенными в пределах от $-\pi$ до $+\pi$. Шум $e(t)$ представлял собой аддитивный белый шум с нулевым математическим ожиданием и единичной дисперсией. В частности, такая модель содержала пять гармонических составляющих, параметры которых приведены в таблице, где $\alpha_{\max} = 1$. В этой же таблице представлены результаты вычисления оценок $\hat{\alpha}_k$ и значения относительных погрешностей для этих оценок $\delta_{\alpha} = 100(\hat{\alpha}_k - \alpha_k)/\alpha_k$ в процентах.

На рис. 1 представлены сумма гармонических составляющих (рис. 1, а) и модель цен-

Параметры гармонических составляющих и их оценки
Parameters of harmonic components and their estimations

| k | f_k^H | α_k | φ_k | $\hat{\alpha}_k$ | $\delta_k, \%$ | $\alpha_k/\alpha_{\max},$ дБ | Сигнал/ шум, дБ |
|-----|---------|------------|-------------|------------------|----------------|---------------------------------|--------------------|
| 1 | 0,2 | 0,1 | -2,6876 | 0,1020 | 2,0 | 20,0 | -23,0 |
| 2 | 0,225 | 0,3 | 2,5576 | 0,3025 | 0,83 | 10,46 | -13,5 |
| 3 | 0,25 | 1,0 | -0,6582 | 0,9985 | -0,15 | 0 | -3,0 |
| 4 | 0,275 | 0,3 | 0,9334 | 0,2947 | 1,76 | 10,46 | -13,5 |
| 5 | 0,3 | 0,1 | 2,1163 | 0,0997 | -0,3 | 20,0 | -23,0 |

трированной реализации сигнала с учетом добавления аддитивного белого шума (рис. 1, б). На рис. 2 приведена оценка амплитудного спектра, а также нормированная оценка амплитудного спектра в децибелах. Они вычислены с разрешением 0,001 единиц нормированной частоты.

Результаты моделирования показывают, что разработанный алгоритм обеспечил обнаружение всех гармонических составляющих, положение которых в оценке амплитудного спектра соответствует табличным данным. Они четко различимы и не маскируются шумом. Ложных линий и расщепления линий не наблюдается. Значения оценок $\hat{\alpha}_k$ вычислены с относительными погрешностями δ_{α} , которые не превышают двух процентов по абсолютной величине. Это говорит о высокой точности оценивания амплитудного спектра в статистическом смысле. Следует особо отметить, что спектральная оценка шума остается на достаточно низком уровне по отношению к оценкам амплитуд. Она практически не превышает -40 дБ. Это

свидетельствует о высокой устойчивости алгоритма к внешним аддитивным шумам.

В реальных условиях алгоритм был апробирован при стендовых исследованиях эксплуатации состояния автобуса марки МАЗ-206067 (категория М3, класс I). Данный автобус предназначен для перевозки пассажиров на городских и пригородных маршрутах средней загруженности. Он оснащен двигателем Mercedes-Benz OM904LA (дизель, 177 л.с.) и шестиступенчатой автоматической коробкой передач ZF6HP504С.

Для регистрации вибрационных сигналов использовались однокомпонентные акселерометры со встроенной электроникой ICP общего назначения 352С04 фирмы изготовителя "PCB Piezotronics, Inc.". Установка акселерометров и обработка вибрационных сигналов осуществлялись с учетом требований по измерению и представлению результатов измерений локальной вибрации, а также согласно требованиям по оценке воздействия локальной вибрации на человека [33–38]. В соответствии с этим были проведены

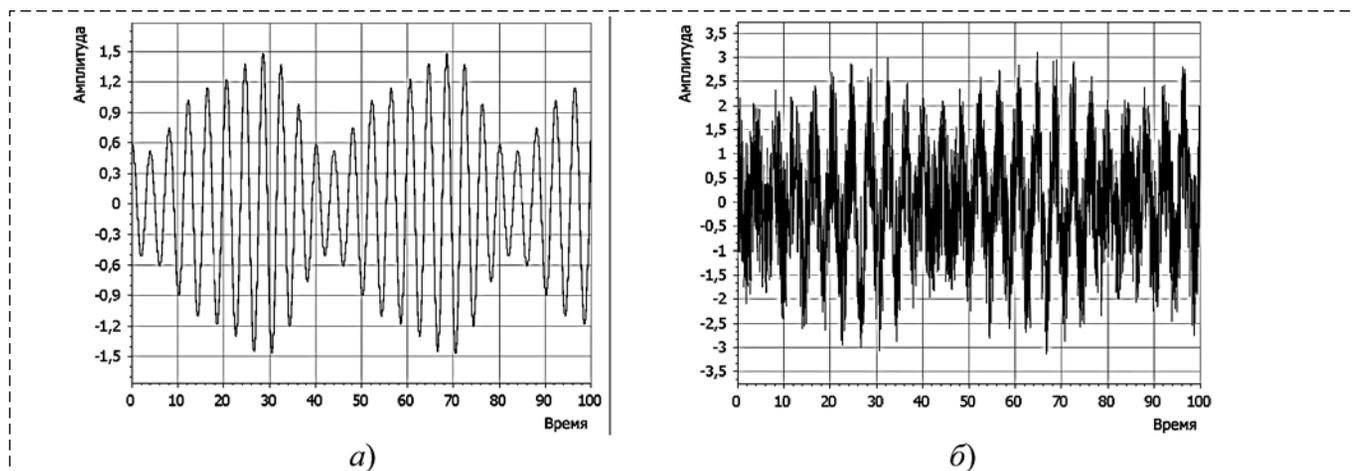


Рис. 1. Сумма гармонических составляющих (а) и модель центрированной реализации сигнала (б)

Fig. 1. Sum of harmonic components (a) and model of centered signal realization (b)

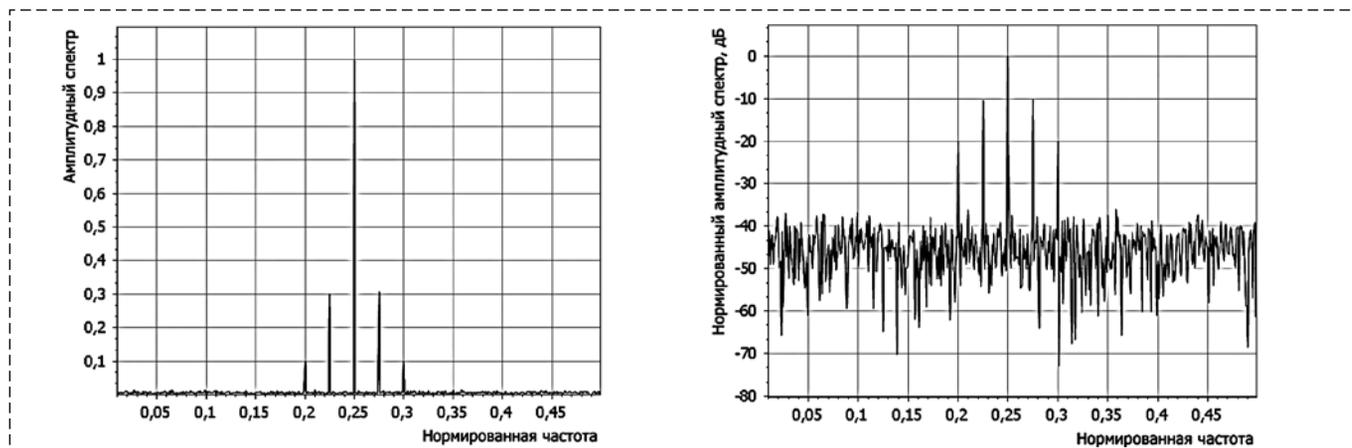


Рис. 2. Оценка амплитудного спектра модели реализации сигнала

Fig. 2. Amplitude spectrum estimation of the signal realization model

исследования влияния режимов работы двигателя на элементы салона. В частности, акселерометры крепились у основания водительского сиденья, на пол перед средней дверью, на боковое оконное стекло над левой задней колесной аркой, на пассажирском сиденьи над двигателем.

Длительность измерений составляла 110 с. Наибольшей интенсивности вибрация достигала на режимах холостого хода. На рис. 3—6 приведены результаты оценивания амплитудного спектра соответствующих вибрационных сигналов для частоты вращения двигателя 750 мин^{-1} . Хорошо

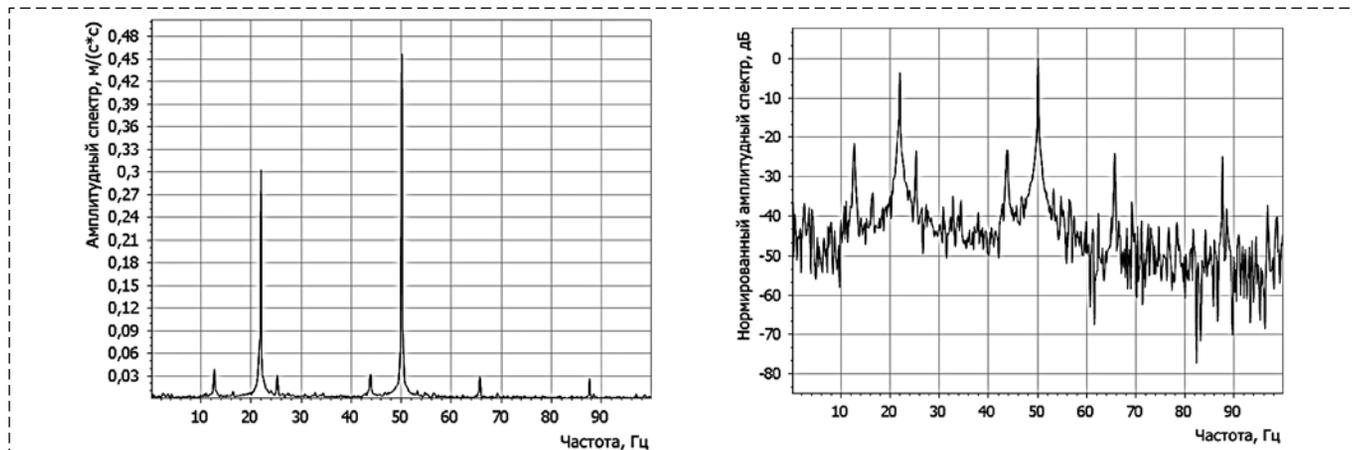


Рис. 3. Оценка амплитудного спектра виброускорения у основания водительского сиденья

Fig. 3. Amplitude spectrum estimation of vibration acceleration at the base of the driver's seat

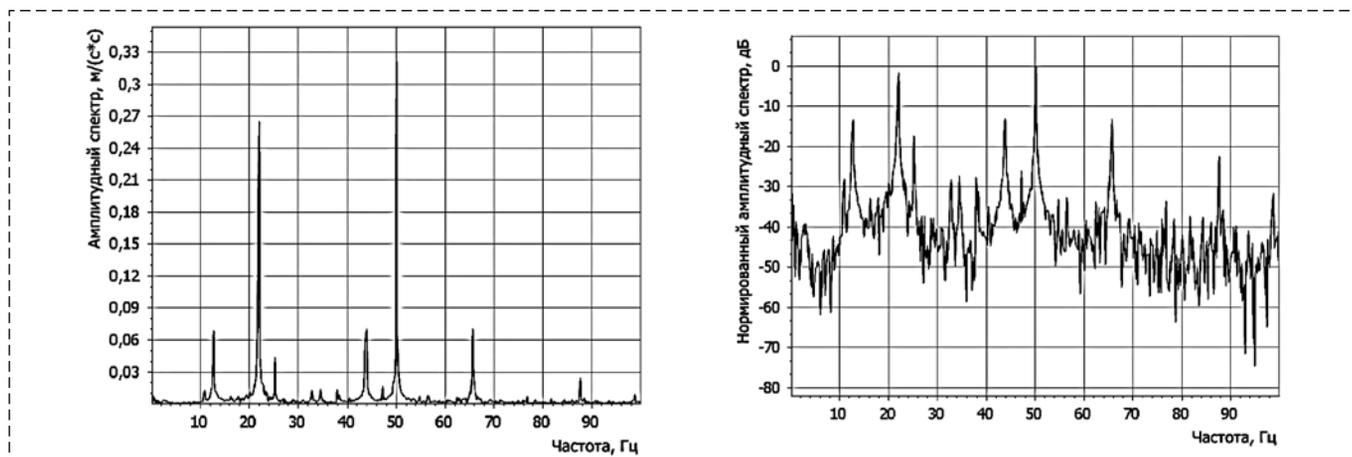


Рис. 4. Оценка амплитудного спектра виброускорения на полу перед средней дверью

Fig. 4. Amplitude spectrum estimation of vibration acceleration on the floor in front of the middle door

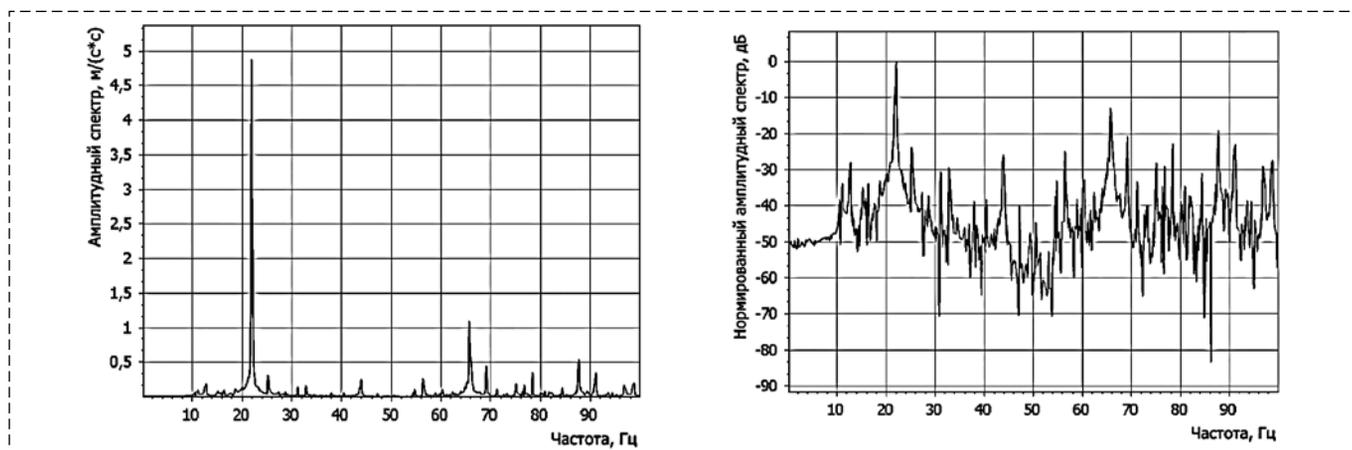


Рис. 5. Оценка амплитудного спектра виброускорения на боковом оконном стекле над левой задней колесной аркой

Fig. 5. Amplitude spectrum estimation of vibration acceleration on the side window glass above the left rear wheel arch

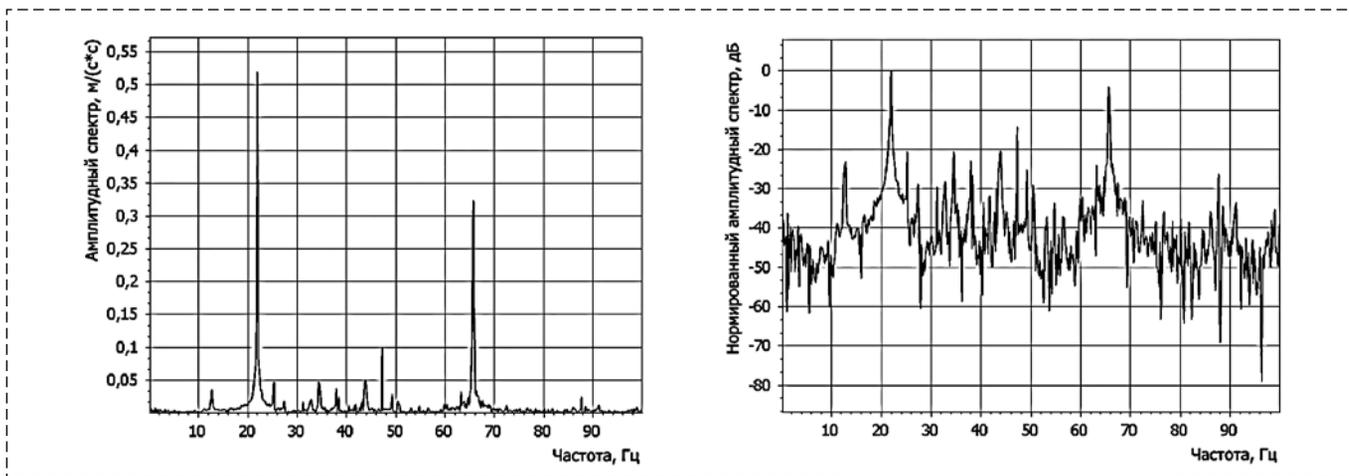


Рис. 6. Оценка амплитудного спектра виброускорения на пассажирском сиденье над двигателем

Fig. 6. Amplitude spectrum estimation of vibration acceleration on the passenger seat over the engine

видно, что разработанный алгоритм обеспечил устойчивое обнаружение гармонических составляющих вибрации.

Заключение

В статье рассмотрен высокопроизводительный цифровой алгоритм оценивания амплитудного спектра, который может быть использован при разработке метрологически значимых программных компонент диагностического обеспечения. Он разработан на основе использования бинарно-знакового аналого-стохастического квантования для преобразования анализируемого сигнала в цифровую форму. Результаты экспериментальных исследований показали, что данный алгоритм позволяет вычислять оценки амплитудного спектра с высокой точностью и частотным разрешением в широком диапазоне частот. При этом алгоритм является простым в вычислительном отношении. Он не требует формировать многоразрядные выборки анализируемого сигнала и осуществлять их последующую обработку с использованием операций цифрового умножения, как этого требуют классические цифровые алгоритмы гармонического анализа. Все это значительно расширяет область возможного применения разработанного алгоритма для решения задач, связанных с оценкой спектрального состава сложных сигналов. Анализ результатов экспериментальных исследований подтвердил практическую применимость предложенного алгоритма для анализа вибрационных сигналов роторных машин и механизмов в условиях сложной шумовой обстановки.

Список литературы

1. **Неразрушающий** контроль и диагностика: Справочник / В. В. Ключев, Ф. Р. Соснин, А. В. Ковалев и др.; Под ред. В. В. Ключева. 2-е изд. М.: Машиностроение, 2003. 656 с.
2. **Колобов А. Б.** Вибродиагностика: теория и практика. М.: ИНФРА-Инженерия, 2019. 252 с.
3. **Benaroya H., Nagurka M., Han S.** Mechanical vibration: Analysis, uncertainties, and control. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2017. 579 p.
4. **Adams M. L.** Rotating machinery vibration: from analysis to troubleshooting. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2010. 476 p.
5. **Brandt A.** Noise and vibration analysis: Signal analysis and experimental procedures. Chichester: Wiley, 2011. 464 p.
6. **Taylor J. I.** The vibration analysis handbook: A practical guide for solving rotating machinery problems. VCI, 2003. 375 p.
7. **ГОСТ 20911—89.** Техническая диагностика. Термины и определения. Введ. 1991-01-01. М.: Стандартинформ, 2009. 11 с.
8. **ГОСТ 24346—80.** Вибрация. Термины и определения. Введ. 1981-01-01. М.: Стандартинформ, 2010. 26 с.
9. **ГОСТ Р ИСО 13373-2—2009.** Контроль состояния и диагностика машин. Вибрационный контроль состояния машин. Часть 2. Обработка, анализ и представление результатов измерений вибрации. Введ. 2001-01-01. М.: Стандартинформ, 2010. 32 с.
10. **Lyons R. G.** Understanding digital signal processing. Third Edition. Prentice Hall PTG, 2011. 944 p.
11. **Proakis J. G., Manolakis D. G.** Digital signal processing. Principles, algorithms and applications. Pearson Prentice Hall, 2007. 1084 p.
12. **Manolakis D. G., Ingle V. K.** Applied digital signal processing: Theory and practice. Cambridge University Press, 2011. 991 p.
13. **Blahut R. E.** Fast algorithms for signal processing. Cambridge University Press, 2010. 453 p.
14. **Bi G., Zeng Y.** Transforms and fast algorithms for signal analysis and representations. Springer-Science + Business Media, LLC, 2004. 422 p.
15. **Britanak V., Yip P. C., Rao K. R.** Discrete cosine and sine transforms: General properties, fast algorithms and integer approximations. Academic Press, Elsevier, 2006. 368 p.
16. **Chu E.** Discrete and continuous Fourier transforms: Analysis, applications and fast algorithms. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2008. 423 p.
17. **Madisetti V. K.** (ed.) The digital signal processing handbook. Digital signal processing fundamentals. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2009. 904 p.

18. Солонина А. И., Уляхович Д. А., Яковлев Л. А. Алгоритмы и процессоры цифровой обработки сигналов. СПб.: БХВ-Петербург, 2002. 464 с.
19. Сюзев В. В. Основы теории цифровой обработки сигналов. М.: РТСофт, 2014. 752 с.
20. Ульянов М. В. Ресурсно-эффективные компьютерные алгоритмы. Разработка и анализ. М.: Физматлит, 2008. 304 с.
21. Цветков Э. И. Основы теории статистических измерений. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отделение, 1986. 256 с.
22. Якимов В. Н. Цифровой комплексный статистический анализ на основе знакового представления случайных процессов // Известия Самарского научного центра РАН. 2016. Т. 18, № 4 (7). С. 1346–1353.
23. Якимов В. Н., Батищев В. И., Машков А. В. Статистическая идентификация линейных динамических систем с использованием знакового аналого-стохастического квантования входного и выходного сигналов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2017. Т. 18, № 9. С. 604–611.
24. Мах Ж. Methodes et techniques de traitement du signal et applications aux mesures physiques. Tome I. Principes generaux et methodes classiques. Paris: Masson, 1996. XXVII. 355 p.
25. Мирский Г. Я. Характеристики стохастической взаимосвязи и их измерения. М.: Энергоиздат, 1982. 320 с.
26. Yakimov V. N. Digital harmonic analysis of multicomponent random processes // Measurement techniques. Springer US, New York. 2006. Vol. 49, N. 4. P. 341–347.
27. Якимов В. Н., Машков А. В., Горбачев О. В. Цифровой гармонический анализ на основе метода усреднения Фурье-преобразования псевдоансамбля сегментов знакового сигнала // Цифровая обработка сигналов. 2016. № 2. С. 31–34.
28. Якимов В. Н., Машков А. В. Знаковый алгоритм анализа спектра амплитуд и восстановления гармонических составляющих сигналов в условиях присутствия некоррелированных фоновых шумов // Научное приборостроение. 2017. Т. 27, № 2. С. 83–90.
29. Yakimov V. N., Gorbachev O. V. Firmware of the amplitude spectrum evaluating system for multicomponent processes // Instruments and experimental techniques. Springer US, New York. 2013. Vol. 56, N. 5. P. 540–545.
30. Якимов В. Н., Машков А. В. Цифровой алгоритм экспериментального оценивания спектрального состава непрерывных сигналов для специализированных систем статистического анализа // Датчики и системы. 2018. № 6 (226). С. 25–30.
31. Якимов В. Н., Машков А. В. Цифровой алгоритм оценивания спектрального состава многокомпонентного процесса вибрации // Контроль. Диагностика. 2018. № 8. С. 40–45.
32. Wainer G. A., Mosterman P. J. Discrete-Event Modeling and Simulation: Theory and Applications. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2011. 493 p.
33. Васильчук А. В., Куликовский К. Л., Ланге П. К. Информационно-измерительные системы стендовых испытаний изделий автомобильной промышленности. М.: Машиностроение-1, 2005. 504 с.
34. ГОСТ ИСО 5348—2002. Вибрация и удар. Механическое крепление акселерометров. Введ. 2008-04-01. М.: Стандартинформ, 2007. 16 с.
35. ГОСТ 31191.1—2004 (ИСО 2631-1:1997). Вибрация и удар. Измерение общей вибрации и оценка ее воздействия на человека. Часть I. Общие требования. Введ. 2008-07-01. М.: Стандартинформ, 2010. 25 с.
36. ГОСТ 55855—2013. Автомобильные транспортные средства. Методы измерения и оценки общей вибрации. Введ. 2014-09-01. М.: Стандартинформ, 2014. 21 с.
37. ГОСТ ИСО 10326-1—2002. Вибрация. Оценка вибрации сидений транспортных средств по результатам лабораторных испытаний. Часть 1. Общие требования. Введ. 2007-11-01. М.: Стандартинформ, 2017. 12 с.
38. ГОСТ ИСО 8002—99. Вибрация. Вибрация наземного транспорта. Представление результатов измерений. Введ. 2001-01-01. Минск: Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2000. 16 с.

Digital Analysis of the Vibration Signals Amplitude Spectrum Based on Fourier Processing of the Binary-Sign Analog-Stochastic Quantization Result

V. N. Yakimov, yvnr@hotmail.com, V. I. Batyshev, vib@list.ru, A. V. Mashkov, mavstu@list.ru,
Samara State Technical University, 443100, Samara, Russian Federation

Corresponding author: Yakimov V. N., D. Sc., Professor,
Samara State Technical University, 443100, Samara, Russian Federation,
e-mail: yvnr@hotmail.com

Accepted on April 10, 2019

Abstract

The article is devoted to the problem of developing a digital algorithm for operational harmonic analysis of complex vibration signals. The basis for solving this problem was the generalized equation of statistical measurements, which defines the measurement procedure as the sequential execution of interrelated measurement and computational transformations. During the development of the algorithm, special attention is paid to analog-to-digital conversion because it directly affects the computational efficiency of digital procedures for obtaining the final result. As such a conversion, the use of binary-sign analog-stochastic quantization is justified, which allows performing two-level quantization without systematic error regardless of the statistical properties of the analyzed signals. The discrete-event model of the binary-sign analog-stochastic quantization result allowed for the analytical calculation of integration operations in the transition to estimating the amplitude spectrum in digital form. As a result, the developed algorithm of harmonic analysis does not require performing digital multiplication operations typical for classical algorithms, which are based on the calculation of the direct discrete Fourier transform. The execution of the algorithm is reduced to the implementation of the addition and subtraction arithmetic operations of the cosine-function values in the time moments determined by the result of the binary-sign analogue-stochastic quantization. The exclusion of digital multiplication operations provided an increase in the computational efficiency of

amplitude spectrum estimation. Laboratory studies of the developed algorithm were carried out using simulation modeling. The simulation results showed that the algorithm allows calculating estimates of the amplitude spectrum of complex signals with high accuracy and frequency resolution in the presence of additive noise. In real conditions, the testing of the developed algorithm was carried out during bench studies of the operational status of the MAZ-206067 bus, designed for the transportation of passengers on urban and suburban routes of average workload. Analysis of the results of experimental studies confirmed the possibility of using the algorithm as part of the diagnosability provision for operational monitoring of vibration signals in a complex noise environment.

Keywords: harmonic analysis, amplitude spectrum, binary-sign analog-stochastic quantization, digital algorithm, diagnosability provision

Acknowledgements: This reported study was funded by Russian Foundation for Basic Research (RFBR) according to research projects 19-08-00228-A and 18-08-00253-A.

For citation:

Yakimov V. N., Batyshev V. I., Mashkov A. V. Digital Analysis of the Vibration Signals Amplitude Spectrum Based on Fourier Processing of the Binary-Sign Analog-Stochastic Quantization Result, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2019, vol. 20, no. 12, pp. 723–731.

DOI: 10.17587/mau.20.723-731

References

1. Klyuev V. V., Sosnin F. R., Kovalev A. V., Filinov V. N. et al. Nondestructive testing and diagnostics: Handbook, Under ed. V. V. Klyuyev, Moscow, Mashinostroenie, 2003, 656 p. (in Russian).
2. Kolobov A. B. Vibration diagnostics: theory and practice, Moscow, INFRA-Engineering, 2019, 252 p. (in Russian).
3. Benaroya H., Nagurka M., Han S. Mechanical vibration: Analysis, uncertainties, and control, CRC Press, Taylor & Francis Group, 2017, 579 p.
4. Adams M. L. Rotating machinery vibration: from analysis to troubleshooting, CRC Press, Taylor & Francis Group, 2010, 476 p.
5. Brandt A. Noise and vibration analysis: Signal analysis and experimental procedures, Chichester: Wiley, 2011, 464 p.
6. Taylor J. I. The vibration analysis handbook: A practical guide for solving rotating machinery problems, VCI, 2003, 375 p.
7. State Standard 20911–89. Technical diagnostics. Terms and definitions, Moscow, Standartinform Publ., 2009, 11 p. (In Russian).
8. State Standard 24346–80. Vibration. Terms and definitions, Moscow, Standartinform Publ., 2010, 26 p. (In Russian).
9. State Standard R ISO 13373-2–2009. Condition monitoring and diagnostics of machines. Vibration condition monitoring. Part 2: Processing, analysis and presentation of vibration data, Moscow, Standartinform Publ., 2010, 32 p. (in Russian).
10. Lyons R. G. Understanding digital signal processing, Third Edition, Prentice Hall PTG, 2011, 944 p.
11. Proakis J. G., Manolakis D. G. Digital signal processing. Principles, algorithms and applications, Pearson Prentice Hall, 2007, 1084 p.
12. Manolakis D. G., Ingle V. K. Applied digital signal processing: Theory and practice, Cambridge University Press, 2011, 991 p.
13. Blahut R. E. Fast algorithms for signal processing, Cambridge University Press, 2010, 453 p.
14. Bi G., Zeng Y. Transforms and fast algorithms for signal analysis and representations, Springer-Science + Business Media, LLC, 2004, 422 p.
15. Britanak V., Yip P. C., Rao K. R. Discrete cosine and sine transforms: General properties, fast algorithms and integer approximations, Academic Press, Elsevier, 2006, 368 p.
16. Chu E. Discrete and continuous Fourier transforms: Analysis, applications and fast algorithms, CRC Press, Taylor & Francis Group, 2008, 423 p.
17. Madisetti V. K. (ed.) The digital signal processing handbook. Digital signal processing fundamentals, CRC Press, Taylor & Francis Group, 2009, 904 p.
18. Solonina A. I., Ulyakhovich D. A., Yakovlev L. A. Algorithms and processors digital signal processing, St. Petersburg, BHV-Petersburg, 2002, 464 p. (in Russian).
19. Suzev V. V. Theory fundamentals of digital signal processing, Moscow, RTSof, 2014, 752 p. (in Russian).
20. Ulyanov M. V. Resource-efficient computer algorithms. Development and analysis, Moscow, Fizmatlit, 2008, 304 p. (in Russian).
21. Tsvetkov E. I. Theory fundamentals of the statistical measurements, Leningrad, Energoatomizdat: Leningrad Branch, 1986, 256 p. (in Russian).
22. Yakimov V. N. *Izvestiya samarskogo nauchnogo tsentra RAN*, vol. 18, 2016, no. 4(7), pp. 1346–1353 (in Russian).
23. Yakimov V. N., Batyshev V. I., Mashkov A. V. *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, vol.18, 2017, no. 9, pp. 604–611 (in Russian).
24. Max J. Methodes et techniques de traitement du signal et applications aux mesures physiques. Tome I: Principes generaux et methodes classiques, Paris, Masson, 1996, XXVII. 355 p.
25. Mirsky G. Ya. Characteristics of stochastic interrelation and their measurements, Moscow, Energoizdat, 1982, 320 p. 611 (in Russian).
26. Yakimov V. N. *Measurement techniques*, Springer US, New York, vol. 49, 2006, no. 4, pp. 341–347.
27. Yakimov V. N., Mashkov A. V., Gorbachev O. V. *Tsifrovaya Obrabotka Signalov*, 2016, no. 2, pp. 31–34 (in Russian).
28. Yakimov V. N., Mashkov A. V. *Nauchnoe priboroostroenie*, vol. 27, 2017, no. 2, pp. 83–90 (in Russian).
29. Yakimov V. N., Gorbachev O. V. *Instruments and experimental techniques*, Springer US, New York, vol. 56, 2013, no. 5, pp. 540–545 (in Russian).
30. Yakimov V. N., Mashkov A. V. *Datchiki i Sistemy (Sensors and Systems)*, 2018, no. 6, pp. 25–30 (in Russian).
31. Yakimov V. N., Mashkov A. V. *Kontrol'. Diagnostika*, 2018, no. 8, pp. 40–45 (in Russian).
32. Wainer G. A., Mosterman P. J. Discrete-Event Modeling and Simulation: Theory and Applications, CRC Press, Taylor & Francis Group, 2011, 493 p.
33. Vasilchuk A. V., Kulikovskiy K. L., Lange P. K. Information and measuring systems bench testing products of the automotive industry, Moscow, Mashinostroyeniye-1, 2005, 504 p. (in Russian).
34. State Standard ISO 5348–2002. Mechanical vibration and shock. Mechanical mounting of accelerometers, Moscow, Standartinform Publ., 2007, 16 p. (in Russian).
35. State Standard 31191.1–2004 (ISO 2631-1:1997). Vibration and shock. Measurement and evaluation of human exposure to whole-body vibration. Part 1. General requirements, Moscow, Standartinform Publ., 2010, 25 p. (in Russian).
36. State Standard 55855–2013. Motor vehicles. Methods of measurement and evaluation of general vibrations, Moscow, Standartinform Publ., 2014, 21 p. (in Russian).
37. State Standard ISO 10326-1–2002. Vibration. Laboratory method for evaluating vehicle seat vibration. Part 1. Basic requirements, Moscow, Standartinform Publ., 2017, 12 p. (in Russian).
38. State Standard ISO 8002–99. Mechanical vibration. Land vehicles. Method for reporting measured data, Minsk, Interstate council for standardization, metrology and certification Publ., 2000, 16 p. (in Russian).