

ГУЛАЙ А. В., ЗАЙЦЕВ В. М.

## ЦИФРОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА ПАРАМЕТРОВ КОЛЕБАНИЙ

Белорусский национальный технический университет

Эффективным подходом к исследованию вибрационных процессов в машинах и механизмах является выполнение Фурье-анализа гармонического состава колебаний. Этот метод экспресс-контроля остается актуальным и востребованным в акустической диагностике машин благодаря своей относительно высокой информативности. Расширение его аналитических возможностей проводится за счет внедрения дополнительных средств цифровой обработки вибрационных сигналов, в том числе интеллектуальных систем. Целью настоящей работы является создание цифрового метода спектрального анализа вибрационных сигналов, реализация которого возможна с применением интеллектуальных приборов. В работе на основе аддитивных комбинаций синусоидальных функций представлен метод полигармонической аппроксимации параметров сигналов, отображающих колебательные процессы в машинах. С использованием теоремы Релея и равенства Ляпунова – Парсевеля реализована технология усечения дискретизированного по времени разложения указанных сигналов в ряд Фурье. Устранение искажений частотного спектра колебаний выполняется путем подавления его боковых лепестков с помощью оконных фильтров. Для сопоставления эффективности различных окон использованы специальные параметры: ширина главного лепестка частотного спектра; коэффициент относительного расширения главных лепестков; максимальный относительный уровень боковых лепестков; коэффициент относительного ослабления энергии сигналов. При этом рассмотрены окна Хэннига, Натолла, Хэмминга, Барлетта, а в качестве базовых значений приняты параметры прямоугольного окна. Выработаны ограничения разрядности аналого-цифровых преобразователей сигналов в зависимости от требуемой точности соблюдения энергетического баланса при усечении дискретных Фурье-разложений. Приведен пример реализации цифровой технологии спектрального анализа параметров колебательных процессов.

**Ключевые слова:** колебательный процесс; спектральный анализ; цифровая технология.

### Введение

Для оценки технического состояния машин и механизмов, которые подвержены влиянию тех или иных колебательных воздействий, применяется значительное количество специализированных приборов и средств программного обеспечения [1, 2]. При исследовании характеристик колебательных процессов в машине может быть получен достаточный объем информации об особенностях ее конструкции, условиях эксплуатации, наличии неисправностей. Однако сложность методов контроля колебаний в машинах, обработки экспериментальных данных, анализа результатов контроля требует введения технологий и алгоритмов цифровой обработки измеряемых сигналов.

Особое значение в динамике машин имеет проблема анализа и прогнозирования параметров вибрационных процессов, предотвращения разрушительных последствий вибрации. Необходимость решения данной проблемы привела к формированию специального раздела науки и техники, основной задачей которого является создание активных виброзащитных систем. Эффективность таких систем во многом определяется точностью контроля наблюдаемых параметров колебательного процесса и обработки полученных экспериментальных данных [3]. Это повышает значимость введения цифровых систем в технологии контроля, которые реализуются с целью создания виброзащиты и повышения надежности машин.

Перспективным направлением построения цифровых технологий и аппаратных средств для реализации анализа и прогнозирования параметров колебательных процессов в машинах и механизмах различного функционального назначения является применение интеллектуальных систем [4]. С развитием методологических и алгоритмических основ, экспертных приемов практического создания и внедрения интеллектуальных технологий расширяется тенденция их использования для комплексного решения важнейших задач цифровой обработки сигналов, несущих фактографическую информацию о колебательных процессах.

Достаточно эффективным подходом к исследованию колебательных процессов в машинах и механизмах является

выполнение Фурье-анализа гармонического состава сигналов вибрации. Этот метод контроля востребован в акустической диагностике машин благодаря своей относительно высокой информативности. Расширение его аналитических возможностей производится за счет внедрения дополнительных средств цифровой обработки вибрационных сигналов. С учетом вышесказанного настоящая работа посвящена созданию цифрового метода спектрального анализа вибрационных сигналов, который может быть реализован с использованием интеллектуальных средств.

### Полигармоническая модель анализа параметров колебаний

Колебательные процессы, возникающие в машинах под действием механических усилий и случайных возмущений, либо закономерны для тех или иных конструктивных построений и исходно сопутствуют работе машин, либо развиваются при возникновении определенных условий. Эти процессы в принципе допускают полигармоническую аппроксимацию с помощью аддитивных комбинаций наборов синусоидальных функций:

$$X(t) = X_1(t) + X_2(t) + X_3(t) + \dots + X_n(t) + \dots,$$

где  $X_n(t) = A_n \sin(2\pi f_n t + \varphi_n)$  – колебательные перемещения, представленные в виде квазистационарных гармонических составляющих с амплитудами  $A_n$ , частотами  $f_n$  и фазами  $\varphi_n$ . Эта модель достаточно эффективна для экспериментальных и теоретических исследований, несмотря на то, что реальные колебательные процессы в большинстве случаев фактически не обладают выраженной периодичностью и стационарностью.

Первостепенное значение в анализе параметров колебательных процессов имеет энергетическая теорема Релея, согласно которой среднее значение энергии на интервале времени  $T$  определяется интегралом от квадрата амплитуды колебательного перемещения:

$$E_X = K_{E_X} T^{-1} \int_0^T X^2(t) dt = K_{E_\omega} \int_0^\infty |X(j\omega)|^2 d\omega,$$

где  $E_X$  – среднее значение энергии на интервале времени  $T$ ;  $K_{E_X}, K_{E_n}$  – коэффициенты масштабных соотношений физических величин [5]. При этом полагается, что  $X(t) = 0$  для  $t < 0$ ;  $X(j\omega)$  – преобразование Фурье сигнала  $X(t)$ , которое соответствует распределению энергии по частотам спектрального разложения этого сигнала.

Равенство Ляпунова – Парсеваля позволяет перейти к линейчатому спектру частот, при этом

$$E_X = 2^{-1} A_0^2 + K_{E_n} \sum_{n=1}^{\infty} A_n^2,$$

где  $K_{E_n}$  – коэффициент масштабных соотношений для амплитудных параметров.

Очевидно, что практический анализ требует усечения гармонического разложения, при котором учитывается конечное число гармоник  $r$ . Обычно экспертным путем устанавливается верхнее допустимое значение относительной погрешности  $\delta_E$  обеспечения энергетического баланса

$$\delta_E = (E_{X,r+1} - E_{X,r}) [E_{X,r+1}]^{-1} = (A_{r+1}^2 - A_r^2) [E_{X,r+1}]^{-1},$$

которое соответствует 0,01–0,05. Это позволяет выбирать уровень ограничения  $r$  количества используемых гармоник.

Проведем исследование колебательных процессов, которое требует предварительной оценки полосы частот ( $f_n; f_b$ ) для измерений и анализа сигналов, а также выбора частоты дискретизации  $F_d$  и количества замеров фактических значений сигналов  $M1$ .

Анализ конструкций машин и механизмов, их кинематических схем и диаграмм развиваемых усилий, мнений экспертов, как правило, позволяет провести предварительную оценку спектра сигналов – аналогов колебательных перемещений и занимаемую ими полосу частот ( $f_n; f_b$ ). В соответствии с теоремой Котельникова – Найквиста частота дискретизации сигналов  $F_d$  и шаг дискретизации по времени  $\Delta t_d$  должны удовлетворять следующему известному условию:

$$F_d = (\Delta t_d)^{-1} \geq 2f_b.$$

При практическом анализе колебательных процессов необходимо выполнение дополнительного требования, в соответствии с которым следует обеспечивать гарантированную вложенность хотя бы одного периода колебаний гармонической составляющей наименьшей частоты  $f_n$  в интервал наблюдения  $T_n$ , начиная от некоторого начального момента времени  $t_{нач}$  и до момента времени  $t_{max}$  [6, 7]:

$$T_n = t_{max} - t_{нач} \geq f_n^{-1}.$$

При указанных условиях выбор значения количества замеров  $M1$  проводится на основе следующего очевидного соотношения:

$$M1 \geq \text{Ant}\{F_d T_n\} = \text{Ant}\{2f_b f_n^{-1}\}.$$

В данном случае в качестве  $M1$  целесообразно использовать значения функции Антье, которая обеспечивает определение верхней целой части аргумента.

Ограничение количества замеров сигналов эквивалентно применению прямоугольных окон наблюдения, при этом измерения сопровождаются образованием в реальном спектре сигналов как основных (главных), так и боковых спектральных лепестков на границах интервала наблюдения. Ширина главных лепестков находится в обратной зависимости от продолжительности интервала наблюдения  $T_n$  и в идеале становится пренебрежительно малой только при  $T_n \rightarrow \infty$ . Боковые лепестки в той или иной мере могут маскировать частотные составляющие слабых сигналов. Для предотвраще-

ния негативных последствий искажения частотных откликов необходимо подавление боковых лепестков, что достигается за счет дополнительного применения специальных оконных технологий. При этом проявляется одна из особенностей данного метода – имеет место расширение главных спектральных лепестков.

Оконное преобразование Фурье  $FX_\phi(j\omega)$  сигнала  $X(t)$  определяется следующим выражением:

$$FX_\phi(j\omega) = \int h_\phi(t - \tau) X(t) e^{-j\omega t} dt,$$

где  $h_\phi(t - \tau)$  – сдвинутая по времени импульсная характеристика оконного фильтра.

Для сопоставления различных окон используется группа специальных параметров, при этом параметры прямоугольного окна принимаются в качестве базовых значений (БЗ). Указанная группа параметров включает: ширину главного лепестка (БЗ  $F_{i, f_0} = 2$  для нормированной шкалы частот  $F_n = f T_n$ ); коэффициент относительного расширения главных лепестков спектра (БЗ  $K_{f_0} = F_r / F_{i, 0} = 1$ ); максимальный относительный уровень боковых лепестков (БЗ  $\gamma_{f_0} = -13$  дБ); коэффициент относительного ослабления энергии сигналов (БЗ  $\beta_{n, 0} = 0$ ). При цифровой обработке вибрационных сигналов достаточно часто применяют различные «гладкие» и непрямоугольные окна (табл. 1). Эти и другие типы окон подбираются индивидуально для обеспечения наиболее эффективно-го применения спектрального анализа в решении конкретных задач технической диагностики [8].

Таблица 1. Параметры окон наблюдения колебательных процессов

Тип окна наблюдения	$F_{i, f_0}$	$K_{f_0}$	$\tilde{a}_{f_0}$ , дБ	$\beta_{n, 0}$ , дБ	Аналитическое представление конечной импульсной характеристики оконного фильтра
Окно Хэннинга	4	2	-35,9	-6	$h_\phi(t) = 1 + \cos(2\pi t)$
Окно Натолла (совмещенные косинусы)	8	4	-93,0	-9	$h_\phi(t) = 2,75 \sum_{r=0}^3 a_r \cos(2\pi r t)$ $a_0 = 0,36358$ $a_1 = 0,4891775$ $a_2 = 0,1365995$ $a_3 = 0,0106411$
Окно Хэмминга	4	2	-42,0	-5,38	$h_\phi(t) = 1,85[0,54 + 0,46\cos(2\pi t)]$

В процессе исследования спектр частот вибрационных сигналов принято разбивать на вложенные спектральные полосы (так называемые подгруппы полос). Гармонические составляющие каждой отдельно взятой вложенной полосы спектра приводятся к некоторому среднему (срединному) значению. Указанные средние значения в виде спектральных линий  $L_{f_n}$  отображаются на соответствующих линейчатых спектрограммах. Точность представления спектров с помощью линейчатых спектрограмм определяется разрешением  $R$ , которое имеет размерность Гц/линию. При заданном разрешении  $R$  количество линий  $LF$  спектра (вложенных частотных полос) определяется следующим соотношением (здесь  $\text{Ant}$  – функция Антье):

$$LF = \text{Ant}\{(f_b - f_n)R^{-1} + 1\},$$

В соответствии с теорией разложения в ряд Фурье гармоника с нулевой частотой  $f_0 = 0$  соответствует постоянной составляющей сигнала, а частота первой гармоники  $f_1$  одновременно является частотным шагом  $\Delta f$  линейчатого спектра и связывается с длительностью интервала наблюдения  $T_n$  соотношением  $f_1 = \Delta f = T_n^{-1}$ . Таким образом, линиям спектра соответствуют определенные частоты:

$$L_0 \rightarrow 0; L_{f_1} \rightarrow f_1; L_{f_2} \rightarrow 2f_1; L_{f_3} \rightarrow 3f_1; \dots; L_{f_{(LF-1)}} \rightarrow (LF - 1)f_1.$$

где  $E_x$  – среднее значение энергии на интервале времени  $T$ ; ряд наблюдений и регистраций вибрационных сигналов, который включает  $M1$  отсчетов  $X(t)$ ,  $i = 0, 1, 2, \dots, M1 - 1$ , подлежит усечению, при этом для соблюдения требуемых условий энергетического баланса применяется следующее логическое правило:

$$r = LF - 1, \text{ если для расчетных значений } LF - 1 > r; \\ LF = r + 1, \text{ если для расчетных значений } LF - 1 < r.$$

### Цифровая технология обработки спектра сигналов

Дискретизированное по времени разложение в ряд Фурье (ДВРПФ) может быть обеспечено путем проведения цифровых расчетов необходимого набора свертки для трансверсальных оконных фильтров с конечными импульсными характеристиками и коэффициентов ряда Фурье на интервале времени  $[t_{\min}; t_{\max}]$ , а также последующего применения технологии численного интегрирования с использованием прорасторонних прямоугольников (схема Бесселя):

$$X_{\Phi}[t_i = i \Delta t_d] = \sum_{\xi=0}^i h_{\Phi}[\xi \Delta t_d] X[(i - \xi) \Delta t_d],$$

где  $i = 0, 1, 2, \dots, M1 + M2 - 1$ ;  $M2$  – ширина окна во временной области в виде количества точек дискретного задания импульсной характеристики фильтра  $\{h_{\Phi}[q], q = 0, 1, 2, \dots, M2 - 1\}$ . Вводится дополнительный параметр  $\Theta$ , который определяется следующим образом:

- $2\Theta = M1 + M2$  для четных значений суммы  $M1 + M2$ ,
- $2\Theta = M1 + M2 - 1$  для нечетных значений  $M1 + M2$ .

Построим итоговое усеченное разложение ДВРПФ:

$$DFX_{\Phi}(t) = a_0/2 + \sum_{n=1}^{LF-1} A_n(n\omega_1) \sin(n\omega_1 t + \varphi_n);$$

$$A_n(n\omega_1) = \{[a_n(n\omega_1)]^2 + [b_n(n\omega_1)]^2\}^{1/2};$$

$$\varphi_n = \arctg\{[a_n(n\omega_1)]/[b_n(n\omega_1)]^{-1}\},$$

где  $\omega_1 = 2\pi\Delta f = 2\pi f_1$ .

Коэффициенты данного разложения имеют следующий вид:

$$a_0 = \Theta^{-1} \sum_{i=0}^{2\Theta-1} X_{\Phi}(t_i);$$

$$a_n(2\pi n\Delta f) = \Theta^{-1} \sum_{i=0}^{2\Theta-1} X_{\Phi}(t_i) \cos(in\pi/\Theta);$$

$$b_n(2\pi n\Delta f) = \Theta^{-1} \sum_{i=0}^{2\Theta-1} X_{\Phi}(t_i) \sin(in\pi/\Theta),$$

где  $n = 1, 2, \dots, (LF - 1)$ . Огибающей линейчатого спектра является модуль спектральной плотности, значение которой формируется как результат оконного Фурье-преобразования  $FX_{\Phi}(j\omega)$  отсчетов сигнала  $X(t)$ .

Рассмотренная технология эффективна, если при выборе разрядности цифро-аналоговых преобразователей сигналов длина разрядной сетки преобразователя  $m$  не грубляет заданную точность обеспечения условий энергетического баланса гармоник. При использовании в качестве аналогового выходного сигнала сенсора напряжения  $U$  относительная погрешность преобразования в значительной мере определяется значением  $2^{-(m+1)}$ . Если значение  $U_{\max}$  соответствует цифровому коду преобразователя  $2^m - 1$ , то после усечения ДВРПФ должно выполняться соотношение

$$U_{\max} 2^{-(m+1)} [U_{\max}]^{-1} \leq (A_{r+1}^2 - A_r^2) [E_{X,r+1}]^{-1}.$$

Таким образом,

$$m \geq 1 - \log_2 \{(A_{r+1}^2 - A_r^2) [E_{X,r+1}]^{-1}\},$$

при этом следует учитывать, что

$$\log_2 \{(A_{r+1}^2 - A_r^2) [E_{X,r+1}]^{-1}\} \leq 0.$$

В технологии Фурье-анализа разложение образуется с помощью набора ортогональных функций косинусов и синусов. Сигнал  $X(t)$  должен быть стационарным или приниматься квазистационарным на интервале наблюдения  $T_n$ , поскольку для получения ДВРПФ или Фурье-преобразования в любой точке времени необходима определенность характера поведения сигнала в будущем, при этом каждый пик сигнала во временной области «распространяется» по всем частотам спектра. Результат преобразования позволяет сделать заключение о наличии некоторой частотной составляющей в спектре сигнала, но вопрос о моменте времени появления этой составляющей остается открытым.

Для уменьшения меры неопределенности, связанной с нестационарностью реальных сигналов, проведение спектрального анализа по Фурье-технологиям в ряде случаев требует дополнительного использования оконного преобразования с определенной импульсной характеристикой окна  $h_{\Phi}(t - \tau)$  и последовательного перемещения окна вдоль оси времени.

Поведение энергетических параметров колебательного процесса в части эволюции его общей энергии и эволюции энергии отдельных гармоник во времени может быть оценено путем выполнения ряда циклов измерений и соответствующих им расчетов. Это позволяет построить систему трендов, выполнить сглаживание и экстраполяцию интересующих энергетических параметров на определенный момент времени.

Обычно интервал времени между циклами измерений и расчетов составляет  $(1-3)T_n$ . При больших значениях времени между циклами наблюдений точность прогноза быстро снижается и результаты теряют свою практическую ценность. Для этих целей применима технология оперативного отслеживания траекторий миграции энергетических параметров с течением времени.

В качестве примера использования предложенного способа проведены экспериментальные исследования виброперемещений корпуса гусеничной машины, которая предназначена для транспортирования радиоэлектронного оборудования. Вибрационные процессы регистрировались во время стоянки транспортной машины при отключенном маршевом двигателе и являлись следствием функционирования навесного мотор-генератора для автономного электроснабжения аппаратуры. Для колебательных процессов корпуса машины характерны следующие исходные значения частотных параметров:  $f_n = 10$  Гц;  $f_n = 1000$  Гц.

На рис. 1 приведен фрагмент, содержащий 32 отсчета периодограммы исходного сигнала виброперемещений, который отражает общий характер развития вибрационного процесса во времени. Шаг дискретизации процесса выбран равным  $10^{-4}$  с; величина сигнала показана в относительных единицах.

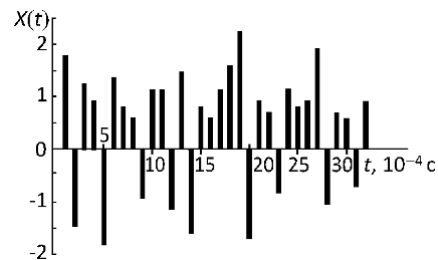


Рис. 1. Фрагмент периодограммы исходного виброперемещений сигнала

Рис. 1. Фрагмент периодограммы исходного вибрационного сигнала

Результаты расчета амплитудно-частотной и фазо-частотной характеристик колебаний приведены на рис. 2. Указанные характеристики представлены в виде линейчатых спектров с шагом по частоте 10 Гц.

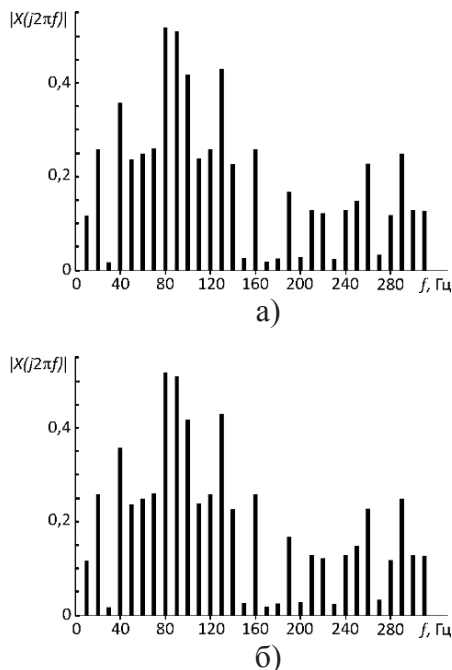


Рис. 2. Амплитудно-частотная (а) и фазо-частотная (б) характеристики вибрационного сигнала

Анализ указанных характеристик показал, что в вибрационном процессе доминируют гармоники в диапазоне частот 40–140 Гц. Максимальные значения амплитуды колебаний наблюдаются на частотах 80; 90 Гц, значительно ниже амплитуда колебаний на частотах 40; 100; 130 Гц. Минимальная интенсивность колебаний характерна для частот 30; 150; 170; 180; 200; 230; 270 Гц. Результаты спектрального анализа колебаний могут учитываться в процессе проектирования оборудования, которое подвергается вибрации, например, при его транспортировании. Кроме того, изучение спектра колебаний необходимо при создании систем гашения вибраций с целью повышения надежности и долговечности машин и механизмов.

### Заключение

Рассмотрен метод полигармонической аппроксимации вибрационных сигналов машин и механизмов с использованием аддитивных комбинаций синусоидальных функций. На основе теоремы Релея и равенства Ляпунова – Парсеваля реализована технология усечения дискретизированного по времени разложения сигналов в ряд Фурье и цифровая технология анализа вибрационных процессов. С целью предотвращения искажений частотного спектра при исследовании колебательных процессов предложено использование методики подавления боковых спектральных лепестков с помощью оконных фильтров. Выработаны ограничения разрядности аналого-цифровых преобразователей в зависимости от требуемой точности соблюдения энергетического баланса при усечении дискретных Фурье-разложений. Приведен пример реализации цифровой технологии интеллектуального анализа параметров колебательных процессов.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Петрухин, В. В. Основы вибродиагностики и средства изучения вибрации / В. В. Петрухин, С. В. Петрухин. – М.: Инфра, Инженерия – Петербург, 2010. – 176 с.
2. Приборы и системы для изучения вибрации, шума и удара. Книга 1 / Под ред. В. В. Клюева. – М.: Машиностроение, 1978. – 439 с.
3. Фурунжиев, Р. И. Проектирование оптимальных виброзащитных систем / Р. И. Фурунжиев. – Минск: Высшая школа, 1971. – 315 с.
4. Гулай, А. В. Архитектура интеллектуальных систем / А. В. Гулай, В. М. Зайцев. – Минск: ИВЦ Минфина, 2018. – 367 с. – (Библиотека инженера по интеллектуальным системам).
5. Тропченко, А. Ю. Цифровая обработка сигналов. Методы предварительной обработки / А. Ю. Тропченко, А. А. Тропченко. – СПб.: ГУИТМО, 2009. – 100 с.
6. Григорьев, А. А. Лекции по теории сигналов / А. А. Григорьев. – М.: МФТИ, 2014. – 327 с.
7. Шахнович, И. В. Современные технологии беспроводной связи / И. В. Шахнович. – М.: Техносфера, 2006. – 288 с.
8. Сапожников, Н. Е. Применение спектрального анализа при диагностике технического состояния турбоагрегатов АЭС / Н. Е. Сапожников, Б. М. Демидюк, О. Д. Чижикова. – Севастополь: Сборник научных трудов СНУЯЭиП, 2013. – № 6. – С. 60–67.

### REFERENCES

1. Petruhin, V. V. Fundamentals of vibrodiagnostics and means of studying vibration / V. V. Petruhin, S. V. Petruhin. – M.: Infra, Inzheneriya – Peterburg, 2010. – 176 s.
2. Instruments and systems for studying vibration, noise and shock. Book 1 / Pod red. V. V. Kljueva. – M.: Mashinostroenie, 1978. – 439 s.
3. Furunzhiev, R. I. Design of optimal vibration protection systems / R. I. Furunzhiev. – Minsk: Vysshaja shkola, 1971. – 315 s.
4. Gulaj, A. V. Intelligent systems architecture / A. V. Gulaj, V. M. Zajcev. – Minsk: IVC Minfina, 2018. – 367 s. – (Biblioteka inzhenera po intellektual'nym sistemam).
5. Tropchenko, A. Ju. Digital signal processing. Pre-processing methods / A. Ju. Tropchenko, A. A. Tropchenko. – CPb.: GUITMO, 2009. – 100 s.
6. Grigor'ev, A. A. Lectures on signal theory / A. A. Grigor'ev. – M.: MFTI, 2014. – 327 s.
7. Shahnovich, I. V. Modern wireless technologies / I. V. Shahnovich. – M.: Tehnosfera, 2006. – 288 s.
8. Sapozhnikov, N. E. Application of Spectral Analysis in Diagnostics of Technical Condition of NPP Turbine Units / N. E. Sapozhnikov, B. M. Demidjuk, O. D. Chizhikova. – Sevastopol': Sbornik nauchnyh trudov SNUJaJeip, 2013. – № 6. – С. 60–67.

*Gulaj A. V., Zajcev V. M.*  
**DIGITAL TECHNOLOGY FOR SPECTRAL ANALYSIS OF OSCILLATION  
 PARAMETERS**

*Belarusian National Technical University*

*Performing the Fourier analysis of the harmonic composition of oscillations is an effective approach to the study of vibration processes in machines and mechanisms. This method of express control remains relevant and highly demanded in the acoustic diagnostics of machines due to its relatively high informativeness. The expansion of its analytical capabilities is implemented by introducing additional means for digital processing of vibration signals, including smart systems. The objective of this work consists in creating a digital method for spectral analysis of vibration signals, the implementation of which would be possible with the use of smart devices. This work presents a method of polyharmonic approximation of the parameters of the signals reflecting oscillatory processes in machines based on the additive combinations of sinusoidal functions. The technology of truncation of the time discretised decomposition of the above signals into a Fourier series is implemented using the Rayleigh theorem and the Lyapunov – Parseval equality. The distortion of the frequency spectrum of oscillations is eliminated by suppressing its side lobes using window filters. To compare the efficiency of different windows, the following special parameters are used: width of the main lobe of the frequency spectrum; coefficient of relative expansion of the main lobes; maximum relative level of side lobes; coefficient of relative attenuation of signal energy. In so doing, the windows of Hanning, Nuttall, Hamming, Barlett were considered, and the parameters of a rectangular window were taken as basic values. The limitations of the digit capacity of analog- to-digital signal converters depending on the required accuracy of maintaining the energy balance when truncating the discrete Fourier expansions have been determined. An example of implementation of the digital technology of spectral analysis of the parameters of oscillatory processes is given.*

*Keywords: oscillatory process; spectral analysis; digital technique.*



**Гулай Анатолий Владимирович**, кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Интеллектуальные и мехатронные системы» Белорусского национального технического университета. Окончил Минский радиотехнический институт (1971), защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук (1982), лауреат Государственной премии в области науки и техники. Область научных интересов: методологические проблемы интеллектуальных технологий; интеллектуальные системы формирования знаний; построение интеллектуальных технических систем.

**Gulaj A. V.**, Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Intelligent and Mechatronic Systems of the Belarusian National Technical University. Graduated from the Minsk Radio Engineering Institute (1971), defended his dissertation for the degree of candidate of technical sciences (1982), laureate of the State Prize in the field of science and technology. Research interests: methodological problems of intellectual technologies; intelligent education systems; construction of intellectual technical systems.

E-mail: is@bntu.by



**Зайцев Владимир Михайлович**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Интеллектуальные и мехатронные системы» Белорусского национального технического университета. Окончил Минский радиотехнический институт (1971), защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук (1974). Область научных интересов: цифровая обработка сигналов; проектирование интеллектуальных систем технического назначения.

**Zajcev V. M.**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Intelligent and Mechatronic Systems of the Belarusian National Technical University. Graduated from the Minsk Radio Engineering Institute (1971), defended his dissertation for the degree of candidate of technical sciences (1974). Research interests: digital signal processing; design of intellectual systems for technical purposes.

E-mail: is@bntu.by