

УДК 531.717.8

Лищенко Н.В.¹, Нежебовский В.В.², Ларшин В.П.¹

¹Одесская национальная академия пищевых технологий

²Харьковский машиностроительный завод "Свет шахтера"

ЧАСТОТНЫЙ АНАЛИЗ НЕРОВНОСТЕЙ ПОВЕРХНОСТИ И ВИБРАЦИЙ ПРИ ЕЁ ОБРАБОТКЕ

Рассмотрены особенности измерения и анализа параметров качества поверхности на основе применения частотного метода разделения гармонических составляющих профилограммы на шероховатость поверхности, её волнистость и отклонение формы профиля.

Ключевые слова: профилограмма, спектральный анализ, частотный подход, шероховатость, волнистость, отклонение формы профиля, виброускорение, виброскорость, виброперемещение.

Розглянуто особливості вимірювання та аналізу параметрів якості поверхні на основі застосування частотного методу розділення гармонічних складових профілограми на шорсткість поверхні, її хвилястість і відхилення форми профілю.

Ключові слова: профілограма, спектральний аналіз, частотний підхід, шорсткість, хвилястість, відхилення форми профілю, віброприскорення, віброшвидкість, вібропереміщення.

The features of measurement and analysis of surface quality parameters through the application of frequency separation method to get harmonic components of profilogram such as roughness, waviness and deviation of the profile are examined.

Keywords: profilogram, spectral analysis, frequency approach, roughness, waviness, the deviation of the profile, vibroacceleration, vibrovelocity, vibrodisplacement.

Введение. Качество обработанной поверхности наряду с требуемым физико-механическим состоянием поверхностного слоя и точностью обработки является важнейшим комплексным показателем, определяющим эксплуатационные свойства деталей машин. Сложность послеоперационного контроля микро – и макрогеометрии поверхности делает актуальной задачу технологической диагностики параметров шероховатости и волнистости обработанной поверхности на основе информационных сигналов, которые можно контролировать при обработке. Источником таких сигналов являются физические явления, сопровождающие процесс лезвийной и абразивной обработки: силовые, температурные и виброакустические. Познание связи этих явлений с указанными параметрами качества деталей машин позволит прогнозировать это качество не только контролем результата (контроль шероховатости и волнистости), но также контролем процесса обработки (например, контролем виброакустических колебаний). Следует отметить, что многие задачи из этого направления не решены в научном плане, другие (решенные задачи) часто недоступны по причине коммерческого интереса фирм-разработчиков.

Неровности поверхности деталей машин и приборов, характеризующие качество этой поверхности, оказывают существенное влияние на эксплуатационные характеристики деталей и изделий машиностроения. Методология назначения и оценки качества поверхности используется на различных этапах жизненного цикла изделия: при конструкторской и технологической подготовке производства, собственно производстве и при контроле (тестировании) выпускаемой продукции. Принято считать, что теория неровностей входит в состав более общей теории размерных параметров, так как все размерные параметры деталей влияют совместно на эксплуатационные свойства соединений этих деталей. Например, при трении и износе соединений деталей совместное влияние на КПД и долговечность изделий оказывают зависящие от размеров зазоры, отклонения формы (овальность конусообразность и др.), волнистость и шероховатость поверхности [1].

За последние годы в мире накоплен опыт в использовании связи качества поверхности с функциональным назначением деталей. За счёт оптимального нормирования параметров шероховатости и их технологического обеспечения достигнуто значительное улучшение качества машин и механизмов, что положительно влияет на их эксплуатационные свойства. В то же время отечественные стандарты по шероховатости поверхности давно не пересматривались, допущено отставание их уровня от соответствующих европейских (DIN) и американских (ASME) стандартов. Отечественные конструкторы не имеют сведений о параметрах шероховатости, которые отражают функциональные возможности поверхностей, работающих на контакт, о влиянии волнистости на функциональные свойства поверхности. В литературе недостаточно сведений о единой концепции измерения и анализа неровностей независимо от вида измеряемой микро – или макронеровности (шероховатость, волнистость, контур) [2,3]. Эта концепция (в зарубежной литературе Perthometer concept) основана на спектральном анализе и преобразовании спектра неровностей независимо от их

метрологической классификации при цифровой обработке данных. Концепция реализуется на модульной компьютеризированной станции (computer-controlled station) для измерения и анализа шероховатости, контура и топографии исследуемой поверхности с одновременным документированием результатов анализа в соответствии с официально действующим стандартом (DIN, ASME) или с учётом требований заказчика.

Инструментом разделения неровностей в интервале их изменения «от микро до макро» является фильтрация цифрового сигнала профилограммы, полученного при помощи компьютеризированной аппаратуры. Однако, в технической литературе нет сведений о методике проведения такого цифрового анализа данных. Как правило, некоторые сведения частично приведены в руководствах к портативным измерительным приборам со встроенными микроконтроллерами (фирма Mitutoyo, Япония), а также к стационарным и лабораторным компьютеризированным станциям типа «Hommel-Etamic T8000» (компания JENOPTIC AG, Германия) и MarSurf LD 120 (компания Mahr GmbH, Германия).

Виброакустические колебания при лезвийной и абразивной обработке представляют собой ещё одно актуальное направление в технологии механической обработки, получившее название технологическая динамика. В этой области частотный подход, представляющий возможности перевода информации из временной формы её представления в частотную форму, используется давно. Это вызвано тем, что виброакустические параметры колебаний (виброускорение, виброскорость, виброперемещение, звуковое давление) по физической своей природе изменяются во времени по мере лезвийной и абразивной обработки в отличие от сигнала неровностей поверхности, который является функцией от одной (обычная одномерная профилограмма) или двух (топография) координат обработанной поверхности.

Имеющиеся сведения по применению частотного подхода к анализу неровностей обработанной поверхности разрознены, основаны на разной терминологии и принятых обозначениях, не связаны с анализом виброакустических колебаний при обработке.

Таким образом, разработка методики измерения и анализа параметров качества обработанной поверхности и виброакустических колебаний при её обработке на основе частотного подхода является актуальной задачей в технологии машиностроения, так как эта методика может быть использована при компьютерной диагностике технологической системы лезвийной и абразивной обработки на станках с ЧПУ.

Цель. Разработать методику цифровой обработки профилограммы поверхности после её фрезерования путём применения частотного подхода к анализу неровностей поверхности и к анализу вибраций при фрезеровании для установления взаимосвязи между полученными спектрограммами профиля поверхности и вибраций при её обработке.

Основная часть. Исследования выполнены на современном оборудовании с ЧПУ (обработка образцов при фрезеровании на обрабатывающем центре мод. 500V/5) и измерительной станции T8000 (измерения параметров качества обработанной поверхности). Станция T8000 – настольного типа, выполнена в виде координатно-измерительной машины с ЧПУ (рис.1). Содержит моторизованную колонну типа Wavelift для вертикального перемещения поперечной траверсы на 400 мм, поворотную опору привода, привод механизма подачи типа Waveline (на длину 60 или 120 мм), двукоординатный измерительный стол без электропривода, гранитную плиту с T-образным пазом. Инструментальный стол типа GTR-4, имеет нишу с принтером и систему пассивного подавления вибраций. Имеется два контактных элемента: безопорный щуп для измерения шероховатости (волнистости) поверхности (набор TKU 300/600) и датчик для измерения контура типа Wavecontour [4].

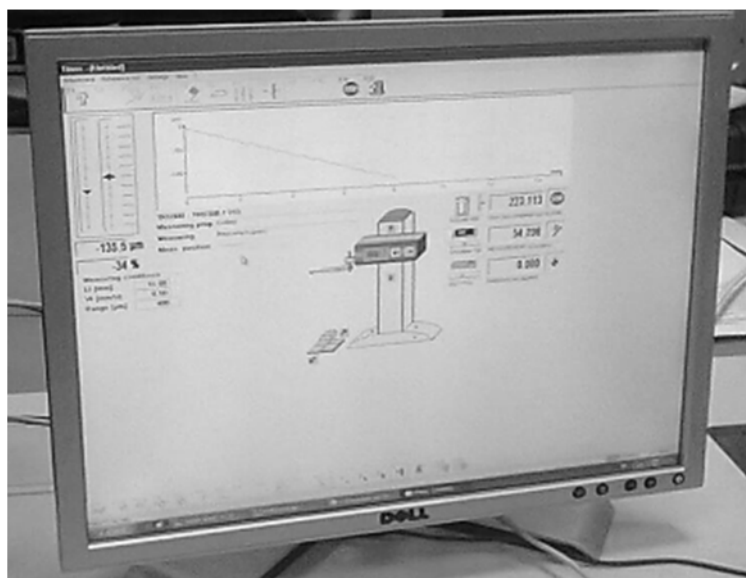
Программное обеспечение – TURBO ROUGHNESS, TURBO WAVE, TURBO CONTOUR и EVOVIS – используется для измерений параметров шероховатости, волнистости, геометрических параметров профиля поверхности и топографии, соответственно, в соответствии со стандартом DIN EN ISO 4287.

Используемые цифровые фильтры позволяют реализовать процедуру разделения длинных и коротких волн, содержащихся в профиле шероховатой поверхности (рис.2). Для разграничения видов неровностей фильтры следующие: RC дискретно вычисляемый (мм) по DIN 4768; Гаусса (M1) цифровой фильтр (мм) по DIN EN ISO 11562, часть 1, (50% Гаусса); двойной Гаусса (M2) для определения относительной опорной длины и R_k - параметров по DIN EN ISO 13565-1.

Предельная длина волн (отсечка шага) для всех фильтров (RC, Гаусса M1 и M2) составляет: 0,025; 0,08; 0,25; 0,8; 2,5; 8 мм. Предельная длина ультракоротких волн λ_s выбирается по ступеням отношения λ_c / λ_s : 30; 100; 300. Базовая длина (sampling length) для шероховатости l_r (или отсечка шага λ_c): 0,08; 0,25; 0,8; 2,5; 8 мм. Скорость трассирования: 0,05; 0,15; 0,5 мм/с.

ПЕРСПЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ПРИЛАДИ

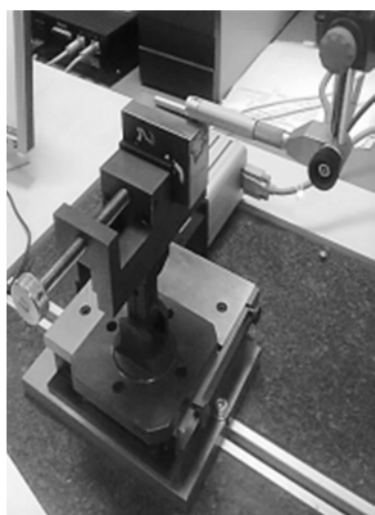
Длина трассирования (traversing length) l_t : 0,48; 1,5; 4,8; 15; 48 мм или переменная от 0,1 до 200 мм (рис.2). Длина оценки l_n (evaluation length): 0,40; 1,25; 4,0; 12,5; 40 мм или переменная отсечка предельной длины волн. Радиус кривизны шупа в режиме измерения шероховатости (волнистости) составляет 2 или 5 мкм, а в режиме измерения профиля: 22; 250; 500; 1000; 2000; 3000 мкм.



а



б



в

Рис. 1. Внешний вид и настройка станции Hommel-Etamic T8000 на измерение после установки в тиски призматического образца (№ 5.2): а – схема настройки (на мониторе прибора) при управлении перемещением датчика; б – вертикальное перемещение датчика перед касанием с образцом; в – исходное положение датчика перед измерением

Алгоритм обработки данных для оценки шероховатости и волнистости содержит два этапа: получение оцифрованного первичного профиля (primary profile), подвергаемого фильтрации, и оценка параметров волнистости и шероховатости в зависимости от цели анализа (рис.2).

Разработана следующая методика измерения и анализа сигнала первичной профилограммы обработанной поверхности.

1. Оцифровка графика профилограммы (рис. 2 а), например, путём выделения дискретного цифрового кода из компьютерного формата «.bmp». Формирование цифрового кода первичного профиля, например, в форматах «Текстовый документ» или Excel.

2. Формирование и анализ сигнала волнистости (рис. 2 б), например, путём построения скользящего среднего с переменными весовыми коэффициентами, определяемыми по закону Гаусса.

3. Вычитание из цифрового образа первичного профиля ординат (для каждого дискретного значения абсциссы) сигнала волнистости (рис. 2 в) для получения цифрового сигнала шероховатости.

4. Анализ сигнала шероховатости на предмет определения его параметров, например, R_a , R_z и R_{max} .

5. Частотный анализ первичного профиля (профилограммы) путём применения быстрого преобразования Фурье.

Определенную сложность в применении частотного подхода представляет переход из «временной» области в частотную. Дело в том, что сигнал, характеризующий профилограмму, не

относится к временному ряду данных $x(t)$ в отличие от, например, сигнала, характеризующего параметры вибраций. Поэтому этот сигнал (профилограмму) представляют последовательностью чисел x_n или $x(n)$, которые по мере дискретного изменения n , где n – целое число, представляют собой результаты равноотстоящих измерений (длина или размер одномерного массива чисел). В этом случае сигнал профилограммы представляет собой ряд дискретных чисел, который может быть подвергнут процедуре цифровой фильтрации. В этом случае по определению Р.В. Хемминга цифровым фильтром является преобразование входного ряда x_n в выходной ряд следующего вида [5]

$$y_n = \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_k x_{n-k} + \sum_{k=1}^{\infty} d_k y_{n-k} \quad (1)$$

где y_n – выходной (n – й) дискретный сигнал на выходе цифрового фильтра ($n = 1, 2, \dots, n$); c_k и d_k – коэффициенты.

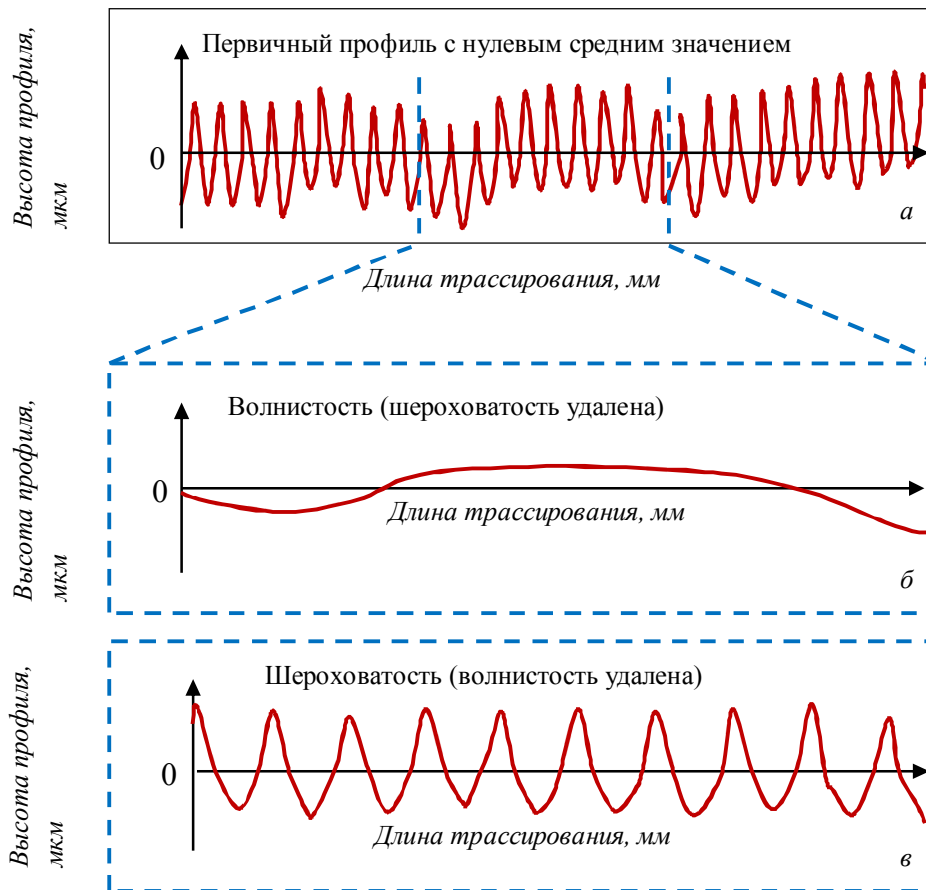


Рис.2. Фильтрация сигнала первичного профиля (а) с выделением сигнала волнистости (б) и шероховатости (в) (не содержит формы и отклонения формы)

Таким образом, цифровой фильтр представляет собой линейную комбинацию равноотстоящих отсчётов x_{n-k} некоторой (входной) функции $x(t)$, а также вычисленных ранее значений на выходе y_{n-k} . Другими словами, для каждого следующего один за другим n формула (1) сдвигает текущую отсчётную точку вдоль потока входных отсчётов x_{n-k} [5].

На примере формулы (1) можно показать отличие нерекурсивного (без обратной связи) фильтра от рекурсивного (с обратной связью). В первом случае все коэффициенты d_k для всех выходных отсчётов y_{n-k} равны нулю, во втором случае коэффициенты d_k не являются нулевыми. Известно, что оба фильтра приводят к изменению фазы гармонических составляющих, проходящих через фильтр [6]. При выделении волнистости поверхности это приводит к искажению амплитуды и положения формируемой при фильтрации волны. Поэтому в соответствии с принятыми европейскими (DIN) и американскими (ASME) стандартами дополнительным требованием к цифровому фильтру является отсутствие фазового сдвига для всех гармонических составляющих, проходящих через фильтр. Идея фазовой коррекции сигнала при цифровой фильтрации была описана в работе [5] и получила дальнейшее развитие в работе [6], в которой говорится о методе построения «фильтра с нулевой фазой». Отличительной особенностью этого фильтра является невозможность его применения в системах реального времени.

Частотный подход к описанию цифровых фильтров в соответствии с формулой (1) позволяет рассмотреть известные математические операции по аппроксимации и сглаживанию дискретных цифровых рядов чисел, как обычные процедуры низкочастотной цифровой фильтрации. Кроме того, в работе [5] показано, что известная математическая операция интегрирования последовательности входных отсчётов какой-либо физической величины также является процедурой низкочастотной цифровой фильтрации. Это в полной мере относится, например, к операции интегрирования входного сигнала виброускорения (вход низкочастотного фильтра – интегратора) при получении выходного сигнала фильтра – интегратора, каким является виброскорость колебаний. Аналогичные рассуждения можно привести к формированию сигнала виброперемещения из сигнала виброускорения.

Сложность построения «фильтра с нулевой фазой» или фазокорректирующего фильтра (phase correcting filter) делает актуальной задачу сглаживания данных профилограммы для выделения профиля волнистости при наименьших искажениях формы и положения получаемой волны. Проведенные поисковые исследования позволили выявить наиболее приемлемый алгоритм сглаживания, имеющийся в приложении Mathcad 14.0: Mathcad Help → Functions → Curve Fitting And Smoothing Functions → Smoothing Data → ksmooth (Gaussian kernel smoothing). Встроенная функция ksmooth (vx, vy, b) создаёт вектор локальных весовых средних элементов в массив vy , используя ядро Гаусса шириной b . При этом, сглаженные элементы из vy формируются в соответствии с выражением

$$vy' = \frac{\sum_{j=1}^n K\left(\frac{vx_i - vx_j}{b}\right) \cdot vy_j}{\sum_{j=1}^n K\left(\frac{vx_i - vx_j}{b}\right)}, \quad (2)$$

где $K(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot (0,37)} \exp\left(-\frac{t^2}{2 \cdot 0,37^2}\right)$; vx – вектор действительных чисел с элементами в возрастающем порядке (аргумент, т.е. вход фильтра); vy – вектор действительных чисел той же длины, что и vx (аргумент, т.е. вход фильтра); b – ширина полосы сглаживающего окна (аргумент, т.е. вход фильтра).

Из сравнения выражений (1) и (2) следует, что алгоритм сглаживания по формуле (2) аналогичен рекурсивному фильтру (т.е. фильтру с обратной связью), поскольку выходной сигнал этого алгоритма сглаживания является функцией не только входного массива vx , но также ранее полученных выходных сигналов фильтра vy . Ширина полосы b обычно устанавливается равной нескольким расстояниям между точками данных на оси x , в зависимости от желаемой степени сглаживания. При определении волнистости принимаем $b = lr$ (или отсечке шага λc), т.е. ширина полосы b равна базовой длине участка определения шероховатости.

Европейский стандарт DIN ISO 11562:1996 определяет метрологические характеристики фазокорректируемых фильтров для измерения поверхностных профилей. Этот стандарт указывает, в частности, как отделить состав длинных волн от состава коротких волн. В соответствии с этим стандартом весовая функция $S(x)$ фазокорректируемого фильтра соответствует по форме Гауссовой функции плотности вероятности (рис.3). Ее уравнение при длине волны отсечки шага фильтра, равной λc , имеет вид [7]

$$S(x) = \frac{1}{0,4697 \cdot \lambda c} \exp\left(-\frac{x^2}{0,4697 \cdot \lambda c}\right). \quad (3)$$

Как следует из выражения (3) на выходе фильтра низкой частоты будут составляющие с длиной волны $x \leq 0,5 \cdot \lambda c$ (см. рис.3), поэтому этот фильтр называют «50% Гауссов фильтр». Этот фильтр низкой частоты пропускает спектральный состав с длинами волн менее, чем 50% от длины волны отсечки шага.

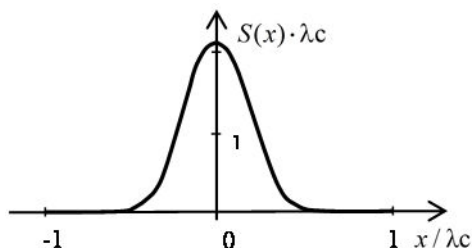


Рис. 3. Весовая функция фазокорректированного «50% Гауссова фильтра»

ПЕРСПЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ПРИЛАДИ

Таким образом, выражения $S(x)$ и $K(t)$ являются аналогичными. Передаточную характеристику фильтра определяют с учётом выражения (1) через весовую функцию (3) посредством Фурье-преобразования (в данной статье не приводится). Коротковолновый набор составляющих профиля (спектр шероховатости поверхности) в соответствии со стандартом находят как разность между профилем поверхности (primary profile) и длинноволновым набором составляющих профиля (выход фазокорректированного фильтра низкой частоты).

Критерии выбора фазокорректированного фильтра следующие [7].

1. Пространственные (вместо термина «временные») и частотные характеристики имеют одинаковое значение.
2. Фильтрованный профиль, даже в области отсечки шага фильтра профиля, не искажается из-за фазового сдвига. Коротковолновая составляющая профиля после прохождения фильтра подобна коротковолновой составляющей оригинального профиля.
3. Передаточные характеристики коротковолновой и длинноволновой составляющих профиля обладают свойствами коррекции фазы и 50%-ой передачи амплитуды на уровне отсечки шага фильтра.
4. Для цифровых систем фазокорректированный фильтр реализуется с использованием Гауссовой аппроксимации.

Экспериментальная проверка методики обработки данных на основе формулы (2) проводилась при анализе профилограммы поверхности фрезерованных образцов № 2.1 и № 5.1 (рис.4). Фрезерование выполнено на станке мод. 500V/5 (обрабатывающий центр) с ЧПУ типа Siemens 840 D при следующих режимах обработки: глубина резания 0,5 мм, подача на зуб 0,15 мм, частота вращения фрезы 950 мин^{-1} (образец № 2.1) и 3800 мин^{-1} (образец № 5.1). Режущий инструмент: фреза концевая с четырьмя зубьями из быстрорежущей стали P6M5 диаметром 18 мм с цилиндрическим хвостовиком под цанговый зажим. Заготовка призматическая из стали марки Ст3 с габаритными размерами 65x50x30 мм [5].

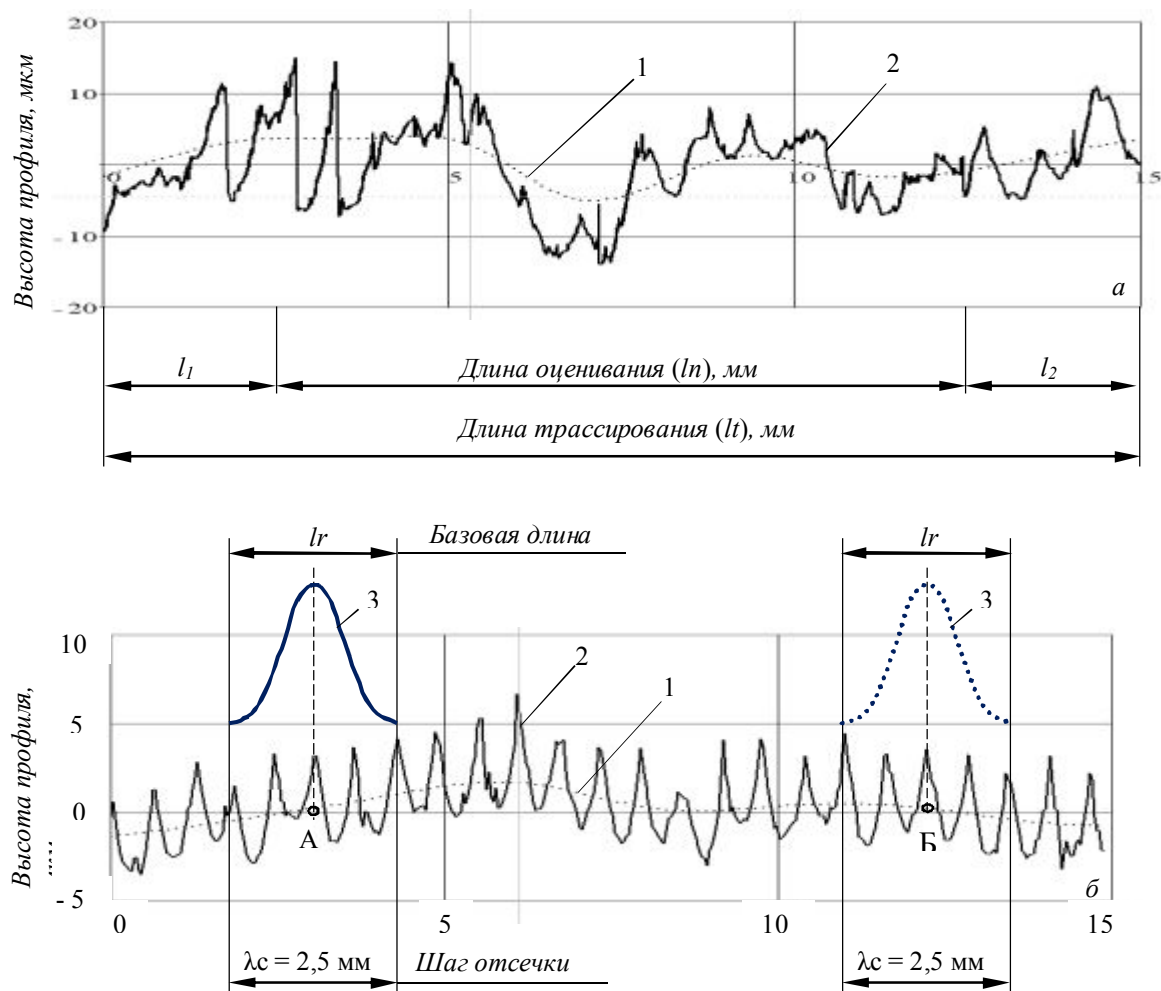


Рис. 4. Построение волнограмм поверхности (1) на основе оцифровки первичной профилограммы (2) с применением функции сглаживания Гаусса (3) для образцов № 2.1 (а) и № 5.1 (б)

В соответствии с международными стандартами выделяют длину оттрассирования lt , и длину оценивания ln , причём $lt = ln + l_1 + l_2$, где l_1 и l_2 – интервалы пути увеличения и уменьшения (переходного процесса изменения) скорости движения шупа по исследуемой поверхности (рис.4, а).

Волнистость выделяют с помощью алгоритма сглаживания, заменяющего фазокорректированный «50% Гауссов фильтр». Для реализации подобного фильтра в программе MathCAD реализована встроенная функция $ksmooth(vx, vy, b)$, ядром которой является весовая функция, описываемая кривой Гаусса (кривая 3 на рис. 4 б). Сущность математической процедуры фильтрации с переменными весами видна на рис.4, б. Например, чтобы получить ординату точки А (рис. 4 б) необходимо произвести перемножение всех ординат кривой 2 на интервале шага отсечки $lс = l_r$ на весовые коэффициенты, определяемые по кривой 3. Затем выполнить расчёт по формуле (2). Количество таких расчётов на базовой длине l_r равно числу дискретных ординат кривой 2 на этой длине. Аналогично получена ордината точки Б (рис.4 б).

Для последующего сравнительного анализа использован участок профилограммы образца 5.1, полученный при длине трассирования 4,8 мм (рис. 5). Уменьшение длины трассирования от $lt = 15$ мм (рис. 4 б) до $lt = 4,8$ мм (рис. 5) вызвано методическими соображениями: время, в течение которого сформирован участок профилограммы при фрезеровании, должно быть близким времени измерения сигнала виброперемещения (рис.6) при фрезеровании этого же участка образца. В системе сбора данных NI-DAQmx с программным обеспечением NI-LabVIEW указанное время составляет 0,2 с [8]. Это время предопределяет текущий спектр сигналов виброускорения, виброскорости и виброперемещения при переходе от временного интервала к соответствующему частотному интервалу. Таким образом, для обеспечения сопоставимости приведенных данных на рис. 5 и рис. 6 соответствующие зависимости высоты профиля (рис. 5) и величины виброперемещения (рис. 6) от времени фрезерования взяты для одного и того же участка обработанной поверхности. Действительно, преобразование оси абсцисс профилограммы (длиной lt) во временную ось ($\Delta t(lt)$ в секундах) можно выполнить по известной формуле для определения машинного времени фрезерования $\Delta t(lt) = (60 \cdot lt) / (n \cdot S_z \cdot z)$, где n – частота вращения фрезы, мин^{-1} ; S_z – подача на зуб фрезы, мм/зуб; z – число зубьев фрезы. Следовательно, при $n = 3800 \text{ мин}^{-1}$, $S_z = 0,15 \text{ мм/зуб}$ и $z = 4$ получаем $\Delta t(lt) = 0,1263 \text{ с}$, что сопоставимо с величиной указанного выше временного интервала 0,2 с.

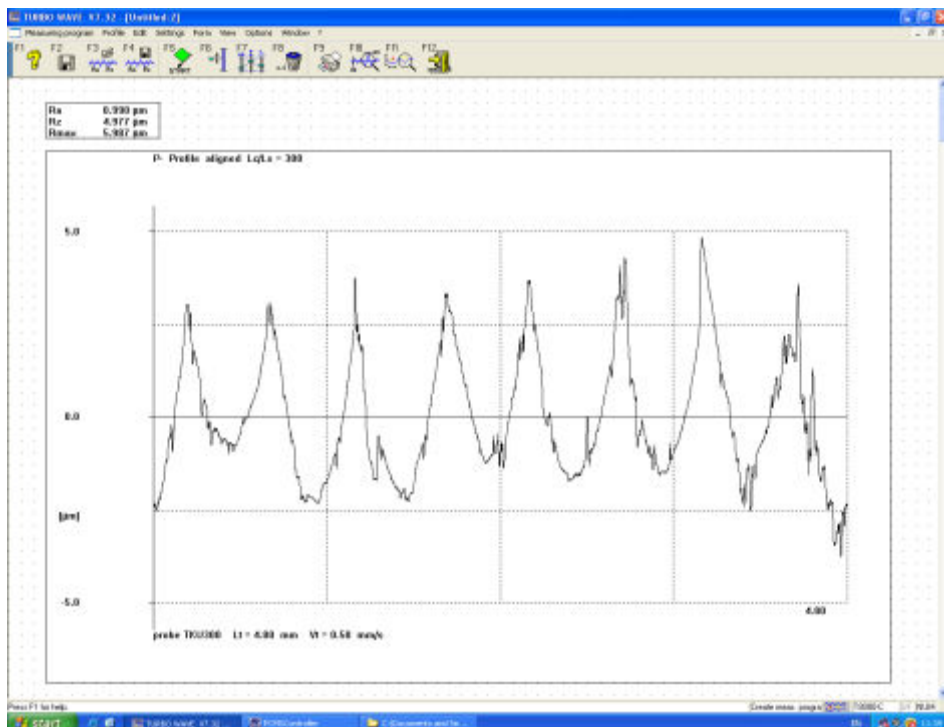


Рис. 5. Профилограмма поверхности образца № 5.1 при $lt = 4,8$ мм (станция Т8000)

Для сравнительного анализа профилограммы (рис.5) и сигнала виброперемещения (рис.6) необходимо выявить частотный состав этих временных сигналов. Для этого в программной среде NI-LabVIEW выходной сигнал профилограммы после её предварительной оцифровки подают на блок Spectral Measurements системы NI-LabVIEW, который осуществляет процедуру быстрого преобразования Фурье (БПФ).

ПЕРСПЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ПРИЛАДИ

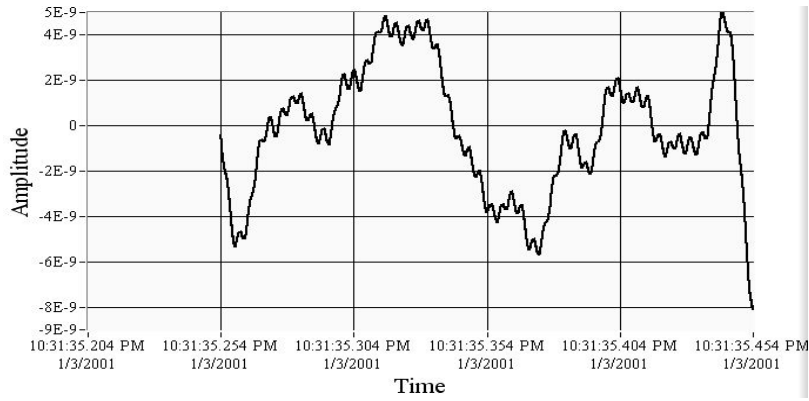


Рис. 6. Временной сигнал виброперемещения при плоском фрезеровании образца № 5.1 (вибродатчик AP2019 расположен на заготовке в направлении оси X станка мод. 500V/5)

Полученный после БПФ результат в виде спектрограммы выведен на переднюю панель виртуального прибора системы NI-DAQmx с помощью использования блоков индикации Waveform Graph (рис. 7).

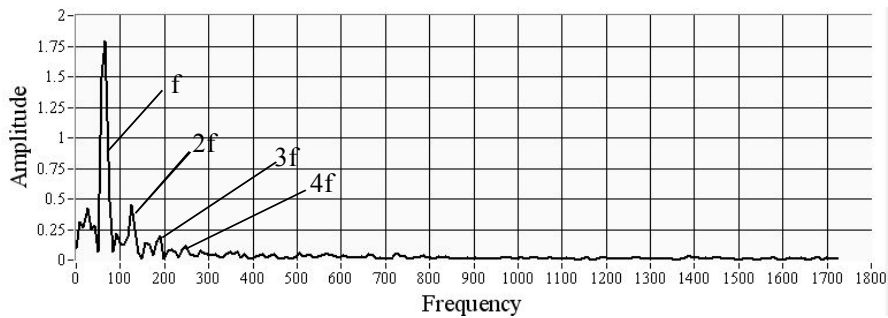


Рис. 7. Спектрограмма оцифрованной профилограммы поверхности образца № 5.1

Аналогичным образом, получена спектрограмма временного сигнала виброперемещения (рис. 8).

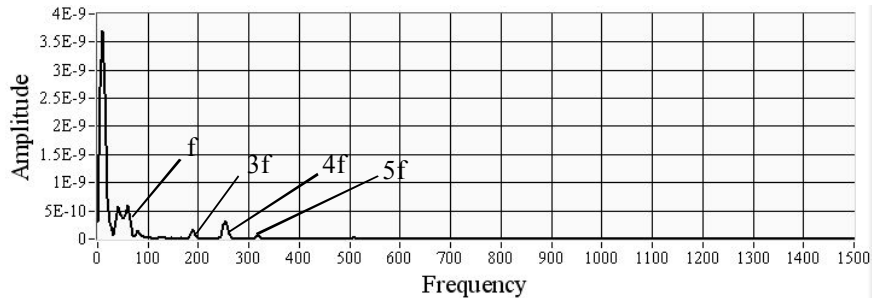


Рис. 8. Спектрограмма сигнала виброперемещения при обработке участка образца № 5.1

В среде LabVIEW существует возможность дифференцировать сигнал, изменяющийся во времени или по координате. Операция дифференцирования сигнала профилограммы выполнена средствами программы LabVIEW следующим образом: Functions → Mathematics → Integration & Differentiation → Time Domain Math → Derivative (dX/dt). На рис. 9 приведен спектр скоростной характеристики профилограммы.

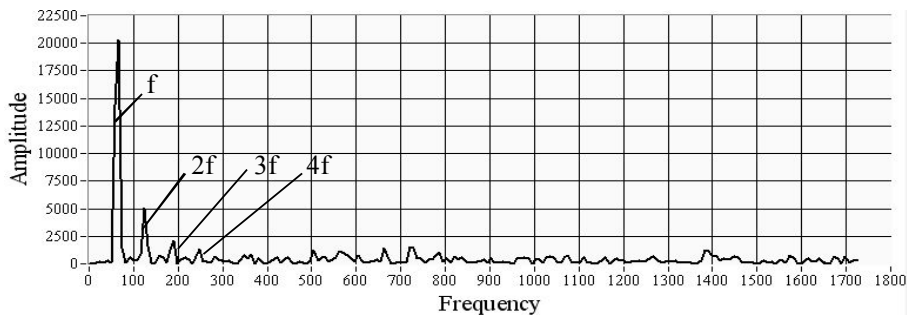


Рис. 9. Спектр скоростной характеристики профилограммы

Для получения спектра сигнала виброскорости выполнено математическое интегрирование исходного сигнала виброускорения, который поступает с акселерометра AP2019, установленного в подсистеме заготовки.

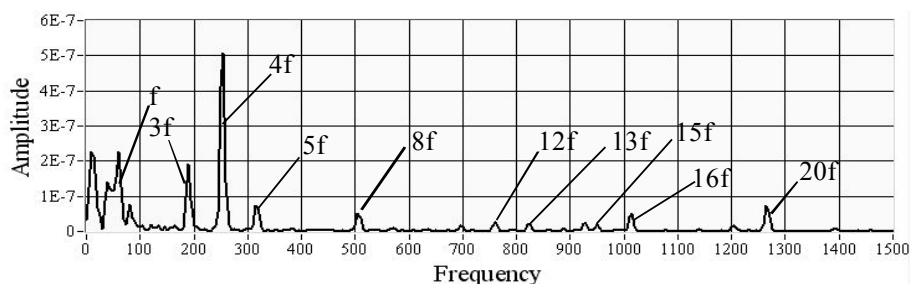


Рис. 10. Спектр сигнала виброскорости

Сравнение спектрограмм (рис. 6 – рис. 10) позволяет заметить сходство, что можно использовать при разработке системы технологической диагностики для распознавания параметров качества поверхности на основе анализа вибраций при фрезеровании (виброускорения, виброскорости и виброперемещения).

Выводы

1. Разработана методика оценивания профилограммы обработанной поверхности в соответствии с современными международными стандартами (DIN, ASME), заключающаяся в оцифровке профилограммы и её спектральном анализе, который позволяет разделить параметры шероховатости и волнистости обработанной поверхности.

2. На спектрах по рис.7 и рис.9 самую большую амплитуду имеет гармоника, соответствующая основной частоте вращения шпинделя, для образца № 5.1 данная частота имеет значение $f = 3800/60 = 63$ Гц.

3. На спектре виброскорости (рис.10) самую большую амплитуду имеет гармоника, соответствующая частоте $4f = 63 \cdot 4 = 252$ Гц.

4. На спектрах по рис.7 и рис.9 кроме гармоники с основной частотой вращения шпинделя наблюдаются гармоники на кратных ей частотах: $2f = 63 \cdot 2 = 126$ Гц; $3f = 63 \cdot 3 = 189$ Гц; $4f = 63 \cdot 4 = 252$ Гц.

5. На спектрах по рис.8 и рис.10 кроме гармоники с основной частотой вращения шпинделя имеют место гармоники с кратными ей частотами: $3f = 63 \cdot 3 = 189$ Гц; $4f = 63 \cdot 4 = 252$ Гц; $5f = 63 \cdot 5 = 315$ Гц и другие.

6. Исследования позволили с единых позиций проводить спектральный анализ профилограммы обработанной поверхности и сигнала виброперемещения в упругой системе металлорежущего станка с целью поиска корреляционных связей между динамическими явлениями в зоне резания и их следствием в виде профилограммы обработанной поверхности.

1. Дунин-Барковский И.В. Измерения и анализ шероховатости, волнистости и некруглости поверхности / И.В. Дунин-Барковский, А.Н. Карташова. – М.: Машиностроение, 1978. – 232 с.

2. Табенкин А.Н. Шероховатость, волнистость, профиль. Международный опыт / А.Н. Табенкин, С.Б. Тарасов, С.Н. Степанов. Под ред. канд. техн. наук Н.А. Табачниковой. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2007. – 136 с.

3. Mahr Perthometer. Surface texture parameters. New Standards DIN EN ISO / ASME [Электронный ресурс]. – Электрон. текстовые данные (311Кб) / http://lab.fs.unilj.si/lat/uploads/metrologija/o_hrapavosti_Mahr_publicacija.pdf.

4. Hommel-Etamic T8000 (компания JENOPTIK) [Электронный ресурс]. – Электрон. текстовые данные (311Кб) / <http://www.metrologi.ru/production/item/1700-hommel-tester-t8000>.

5. Хемминг Р.В. Цифровые фильтры: Пер. с англ./ Под ред. А.М. Трахтмана. – М.: Сов. Радио, 1980. – 224 с.

6. Ричард Лайонс. Цифровая обработка сигналов: Второе издание. Пер. с англ. – М.: ООО «Бином-Пресс», 2009. – 656 с.

7. Приборы контактные (щуповые) для измерения шероховатости поверхности. Метрологические характеристики фазокорректированных фильтров: ГОСТ Р 8.652-2009. – М.: Стандартиформ, 2009. – 6 с.

8. Лищенко Н.В. Влияние вибраций на волнистость обрабатываемой поверхности при фрезеровании / Н.В. Лищенко, В.П. Ларшин // Інформаційні технології в освіті, науці та виробництві: збірник наукових праць [Текст]. – Вип. 3(8) . – О.: Наука і техніка, 2015. – С. 254-260.