

УДК 621.91

Исследование корреляционной связи между вибросигналом и профилограммой обработанной поверхности

Руднев Сергей Кириллович^(*) rudnev@bmstu.ru

Вылуск Варвара Павловна viluskv@bmstu.ru

Куулар Андрей Тараевич kuular@bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. В работе исследуется возможность оперативной оценки качества поверхности при механической обработке путем анализа вибраций. Гипотеза исследования заключается в том, что между вибросигналом от шпинделя станка и профилем обработанной поверхности существует взаимосвязь. Для проверки гипотезы был проведен эксперимент с записью вибраций и последующим измерением шероховатости. Предварительный анализ показал, что значимая корреляция отсутствует в исходных сигналах и их спектрах, но была выявлена в их низкочастотных огибающих. Результаты подтверждают перспективность использования вибросигнала для косвенного контроля шероховатости прямо в процессе обработки.

Ключевые слова: вибродиагностика, шероховатость поверхности, корреляционный анализ, профилограмма, шероховатость

Correlation Analysis of Vibration Signals and Surface Profiles in Machining

Rudnev Sergey Kirillovich^(*) rudnev@bmstu.ru

Vylusk Varvara Pavlovna viluskv@bmstu.ru

Kuular Andrey Taraevich kuular@bmstu.ru

BMSTU, Moscow, Russia

Abstract. This study investigates the possibility of real-time surface quality assessment during machining through the analysis of vibration signals. The research hypothesis posits a correlation between the vibration signal from the machine tool spindle and the profile of the machined surface. An experiment involving vibration recording and subsequent roughness measurement was conducted to test this hypothesis. Preliminary analysis revealed no significant correlation in the raw signals and their frequency spectrum. The results confirm the potential of using vibration signals for the indirect monitoring of surface roughness directly during the machining process.

Keywords: vibration-based diagnostics, surface roughness, correlation analysis, surface profile, roughness

Введение. Качество поверхностного слоя является одним из ключевых факторов, определяющих эксплуатационные характеристики изделий в машиностроении [1, 3]. Как правило, качество изготовления поверхности оценивает-

ся с помощью дискретных параметров шероховатости R_a и R_z уже после съема детали со станка [2]. Такой метод не позволяет оперативно вмешаться в процесс и приводит к потерям времени и росту себестоимости продукции. В связи с этим актуальной задачей является разработка методов косвенного, контроля качества поверхности непосредственно в процессе обработки.

Одним из наиболее информативных и технологичных источников данных о процессе резания является виброакустический сигнал. Он содержит информацию о динамике взаимодействия инструмента и заготовки, что напрямую связано с формируемой топографией поверхности.

Целью данной работы является исследование возможности косвенной оценки шероховатости обработанной поверхности путем анализа вибросигнала, регистрируемого в процессе фрезерования.

Материалы и методы. Основная гипотеза исследования заключается в том, что сигналы виброускорения, регистрируемые в процессе обработки, и профилограмма обработанной поверхности имеют корреляционную связь. Это обусловлено тем, что оба сигнала являются регистрируют один физический процесс — взаимодействие режущей кромки инструмента с материалом заготовки. Вибросигнал отражает колебания системы «станок – приспособление – инструмент – деталь» (СПИД) в процессе формирования поверхности, которая впоследствии измеряется профилометром.

Экспериментальные исследования были проведены на фрезерном обрабатывающем центре вертикальной компоновки (рис. 1). На шпиндельном узле 1 в направлении оси X с помощью магнита был закреплен акселерометр 2 (мод. РСВ 353С33), в цанге закреплена твердосплавная концевая фреза 3 ($\varnothing 6$ мм, z2), заготовка 4 из алюминиевого сплава Д16Т закреплена в тиках 5.

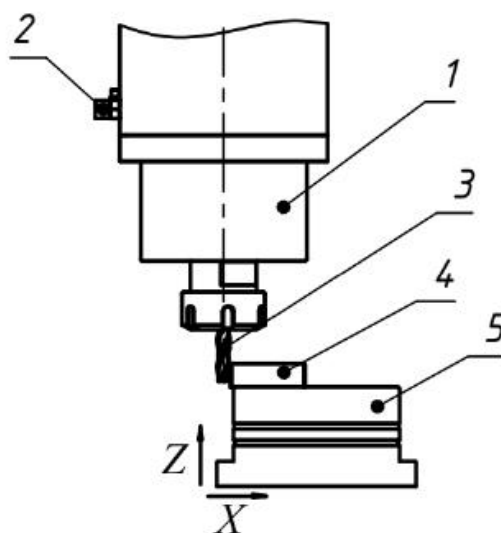


Рис. 1. Схема проведения эксперимента

Параметры резания варьировались для получения поверхностей с различной шероховатостью, глубина резания оставалась неизменной для всех образцов.

Таблица 1

Режимы резания

№ образца	Ширина фрезерования, мм	Подача, мм/мин
I	0,5	500
II	1	1 000
III	0,5	2 000

Сигналы усиливались и оцифровывались с частотой дискретизации 10 кГц с помощью аппаратно-программного комплекса на базе модуля National Instruments NI USB-4431.

Сразу после обработки для каждого образца проводилось измерение шероховатости контактным профилометром Mitutoyo Surftest SJ-210. Измеряемыми параметрами были приняты среднее арифметическое отклонение профиля R_a и высота неровностей профиля по десяти точкам R_z . Для каждого образца были также зафиксированы профилограммы.

Результаты. В ходе эксперимента для каждого режима резания были синхронно получены два типа данных: временной сигнал виброускорения, регистрируемый с акселерометра на шпиндельном узле, и профилограмма обработанной поверхности, снятая контактным профилометром (рис. 2).

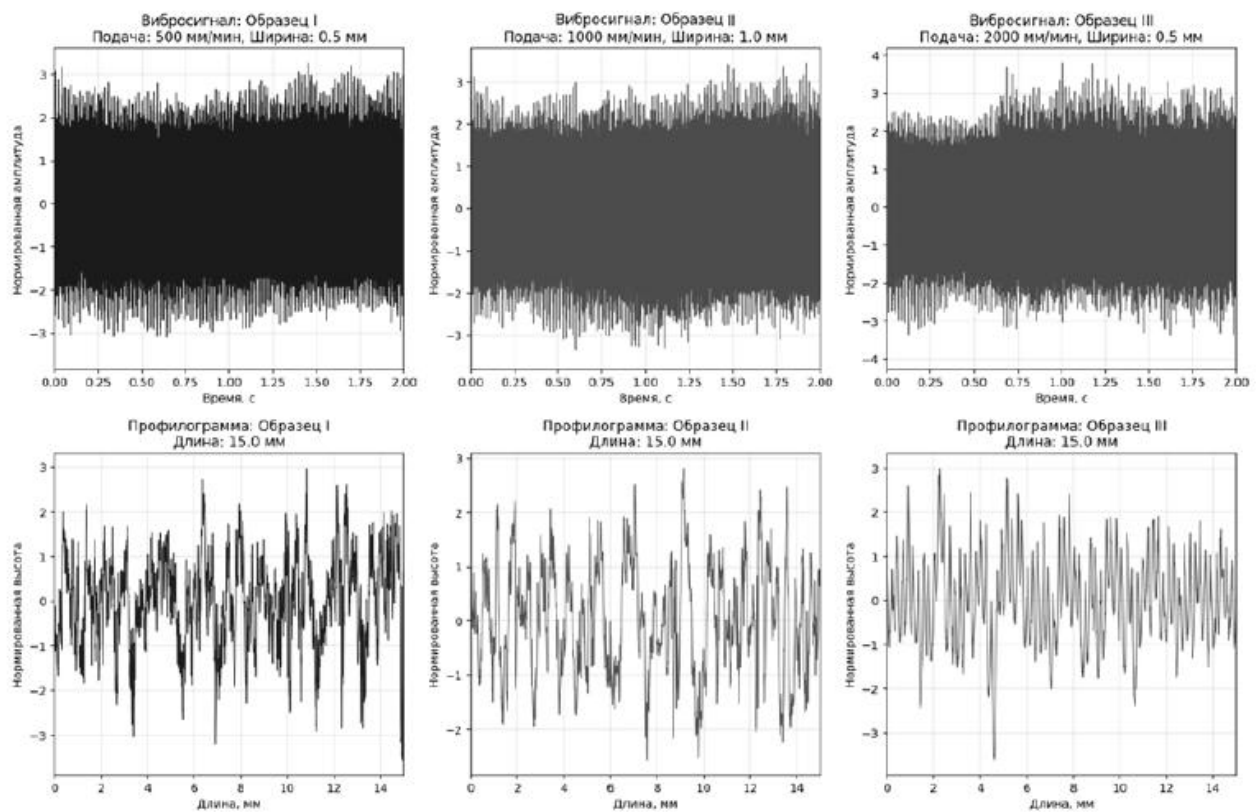


Рис. 2. Зарегистрированные сигналы

Для обеспечения сопоставимости разнородных сигналов (временного вибросигнала и пространственного профиля поверхности) была проведена их специальная подготовка. Профилограмма, представляющая собой зависимость высоты неровности Z от продольной координаты L (мм), была преобразована в псевдо-временную область [5]. Это преобразование основано на кинематике процесса резания: пространственный период неровностей поверхности можно соотнести с временным периодом вибраций через значение подачи S (мм/с). Преобразование координаты L в псевдо-время t' выполнялось по формуле (1). Такое преобразование позволяет рассматривать оба сигнала как функции времени.

$$t' = \frac{L}{S} \quad (1)$$

Для исследования связи между процессами резания (вибросигнал) и результатом обработки (профилограмма) был применен метод взаимной корреляции. Вычислялась нормализованная функция между вибросигналом $a(t)$ и преобразованным сигналом профилограммы $z(t')$:

$$Raz(\tau) = \left(\frac{1}{\sigma_a \sigma_z} \right) * \int [a(t) - \mu_a] * [z(t' + \tau) - \mu_z] dt \quad (2)$$

где τ — временной лаг; μ_a , μ_z — средние значения сигналов; σ_a , σ_z — стандартные отклонения сигналов.

Анализ проводился для различных временных лагов в диапазоне ± 100 мс. Сила корреляционной связи оценивалась по величине коэффициента взаимной корреляции Raz^{max} , а характер связи — по положению максимума корреляционной функции. Результаты поиска корреляционных связей сигналов приведены в таблице 2.

Таблица 2

Результат анализа

Образец	Raz^{max}
I	0.000748
II	0.001674
III	0.005414

Проведенный корреляционный анализ временных реализаций вибросигнала и профилограммы обработанной поверхности не выявил статистически значимой линейной связи между исследуемыми процессами. Полученные значения коэффициента корреляции $R_{max} < 0,1$ для всех режимов резания свидетельствуют о зависимости, что может быть обусловлено комплексным характером взаимодействия режущего инструмента с материалом заготовки и влиянием случайных факторов технологического процесса.

Установленный факт отсутствия значимой временной корреляции актуализирует необходимость применения альтернативных методов анализа,

в частности, спектрального подхода [1, 4]. Переход в частотную область представляет особый интерес, поскольку позволяет распознать скрытые периодические компоненты и установить соответствие между частотами вибраций и пространственными гармониками профиля поверхности.

Для выявления корреляционных связей между вибросигналом и профилограммой применялся метод спектрального анализа. Исходные сигналы преобразовывались в частотную область с помощью быстрого преобразования Фурье (БПФ):

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-j2\pi kn/N}. \quad (3)$$

Пространственные частоты профилограммы преобразовывались во временные через скорость резания 169,6 м/мин, соответствующую параметрам обработки (диаметр фрезы 6 мм, частота вращения 9000 об/мин). Коэффициент спектральной корреляции рассчитывался как скалярное произведение нормированных спектров, что позволило исключить влияние абсолютных значений амплитуд и сосредоточиться на анализе формы спектральных характеристик. Анализ выявил низкие значения коэффициента спектральной корреляции (0,000291 для Образца I, 0,000174 для Образца II и 0,000631 для Образца III), что свидетельствует об отсутствии значимой линейной связи в частотной области между исследуемыми сигналами (рис. 3).

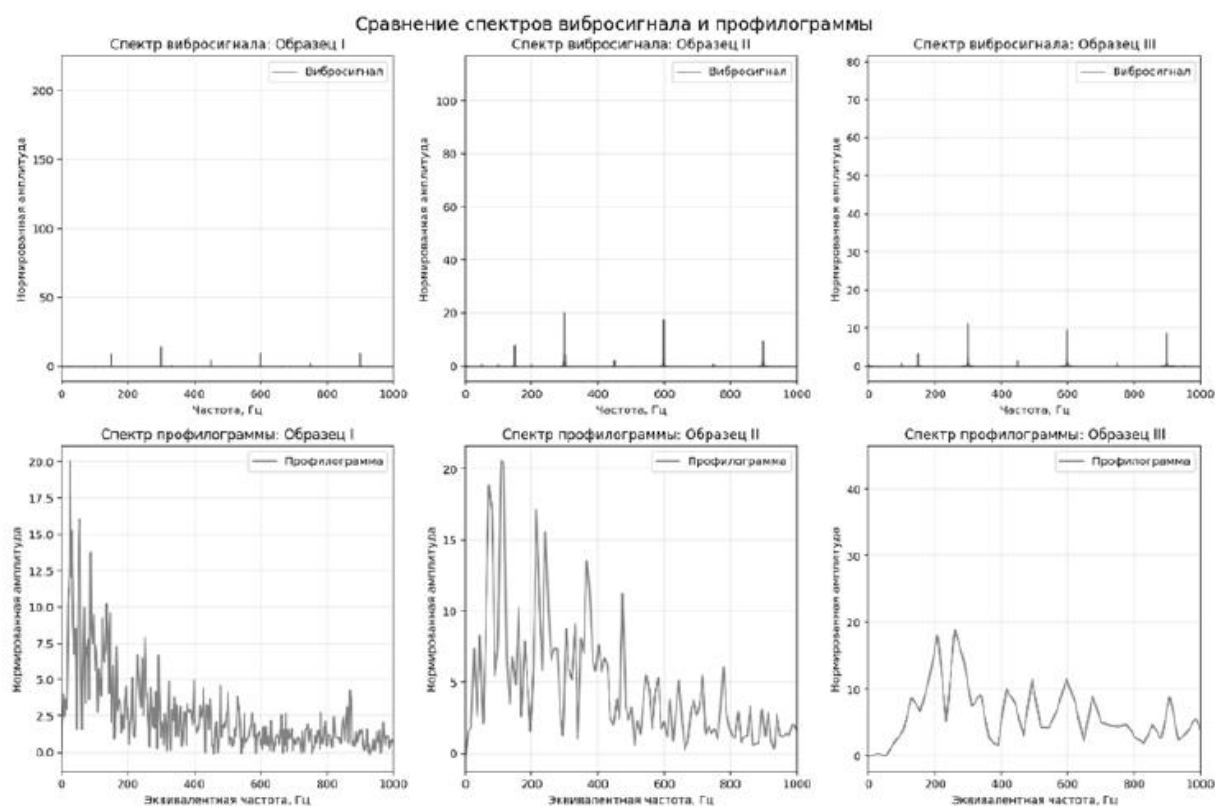


Рис. 3. Спектры вибросигналов и профилограмм

Для дальнейшего анализа был использован метод анализа огибающих сигналов, основанный на преобразовании Гильберта, для выявления низкоча-

стотных модуляционных составляющих вибросигнала и профилограммы. Данный подход позволил абстрагироваться от высокочастотных компонент, связанных с кинематикой процесса резания, и сосредоточить внимание на медленных изменениях амплитуды, обусловленных динамическими явлениями в технологической системе. Нормированные огибающие подверглись корреляционному анализу с учетом временных масштабов, соответствующих продолжительности записи каждого образца (рис. 4).

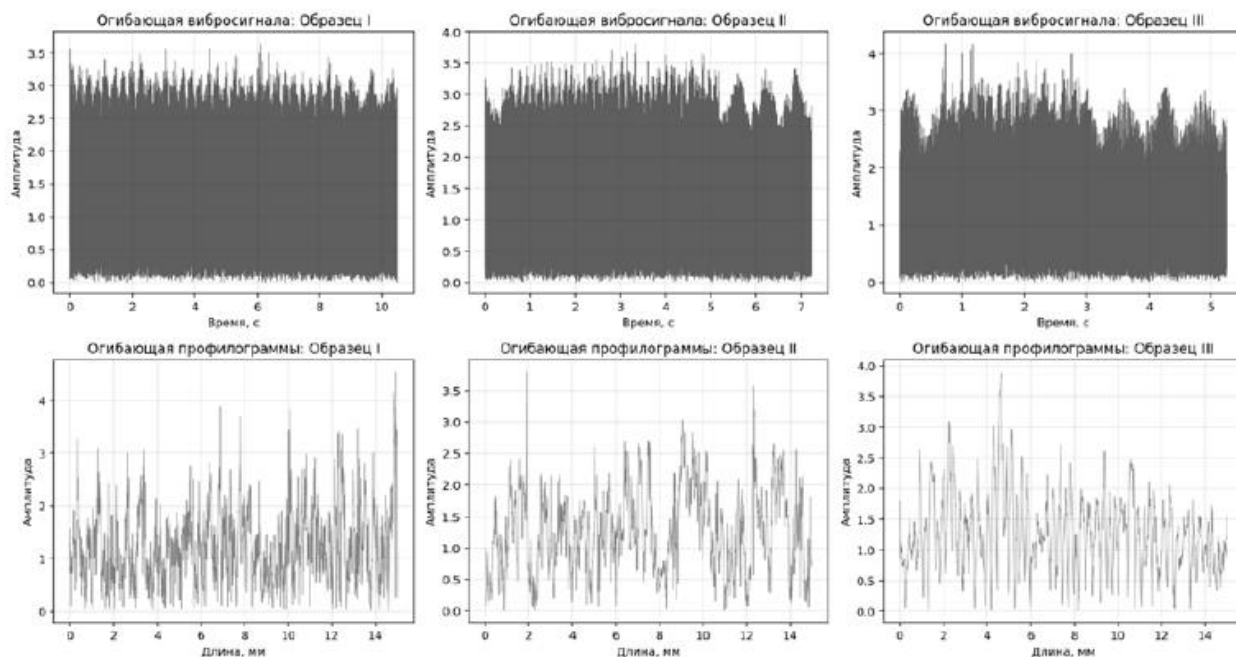


Рис. 4. Огибающие вибросигналов и профилограмм

Результаты исследования выявили выраженную зависимость коэффициента корреляции от режимов резания: наблюдается монотонный рост корреляционной связи с увеличением скорости подачи от $R = 0,0026$ (500 мм/мин) до $R = 0,153$ (2000 мм/мин). Полученные значения свидетельствуют об усилении влияния динамических процессов на формирование поверхностного рельефа при переходе к более интенсивным режимам обработки.

Закключение. В ходе исследования подтвердилась гипотеза о наличии корреляционной связи между вибросигналом и профилограммой, однако эта связь оказалась не такой прямой, как предполагалось изначально. Значимая корреляция проявляется не в исходных высокочастотных сигналах или их спектрах, а в их низкочастотных огибающих. Это означает, что на качество поверхности в большей степени влияют не быстрые колебания от ударов каждого зуба фрезы, а более медленные динамические процессы в технологической системе (станке, приспособлении, инструменте).

Полученные результаты показывают перспективность использования анализа огибающей вибросигнала для разработки систем оперативного контроля шероховатости непосредственно в процессе механической обработки.

Список источников

- [1] Уайтхаус Д. *Метрология поверхностей: принципы, промышленные методы и приборы*. Долгопрудный, Интеллект, 2009, 471 с.
- [2] Порошин В.В. *Основы комплексного контроля топографии поверхности деталей*. Москва, Машиностроение-1, 2007, 196 с.
- [3] Суслов А.Г. и др. *Инженерия поверхности деталей*. Москва, Машиностроение, 2008, 318 с.
- [4] Марпл-мл. С.Л. *Цифровой спектральный анализ и его приложения*. Москва, Мир, 1990, 584 с.
- [5] Досько С.И., Молчанов А.А., Бушуев С.В. Способы повышения информационной эффективности профилометрии. *Вестник машиностроения*, 2021, № 12, с. 40–43.
<https://doi.org/10.36652/0042-4633-2021-12-40-43>

A2

**Инструментальная
техника и технологии**

