

УДК 531.717.8

Н.В. Лищенко, канд. техн. наук, В.П. Ларшин, д-р техн. наук,
Одесса, Украина

РАЗДЕЛЕНИЕ ПРОФИЛЯ ПОВЕРХНОСТИ НА СИСТЕМАТИЧЕСКУЮ И СЛУЧАЙНУЮ СОСТАВЛЯЮЩИЕ

Розроблено та апробовано методику розділення вихідного сигналу, що характеризує профіль обробленої поверхні, на систематичну і випадкову складові цього сигналу із застосуванням кореляційного аналізу вихідного сигналу. Показана можливість кількісної оцінки частки цих складових у вихідному сигналі на основі аналізу корелограми вихідного сигналу. Відзначено спадкоємність теоретико-імовірнісного і частотного підходів до аналізу вихідного сигналу. Відображено універсальність частотного підходу, який поширюється на зазначені складові сигналу.

Ключові слова: профіль поверхні, систематична і випадкова складові, сигнал, частотний підход

Разработана и апробирована методика разделения исходного сигнала, характеризующего профиль обработанной поверхности, на систематическую и случайную составляющие этого сигнала с применением корреляционного анализа исходного сигнала. Показана возможность количественной оценки доли этих составляющих в исходном сигнале на основе анализа корелограммы исходного сигнала. Отмечена преемственность теоретико-вероятностного и частотного подходов к анализу исходного сигнала. Отражена универсальность частотного подхода, который распространяется на указанные составляющие сигнала.

Ключевые слова: профиль поверхности, систематическая и случайная составляющие, сигнал, частотный подход

A technique based on the correlation analysis to divide an initial signal that indicates the machined surface profile into two components – systematic and random ones – is developed and approved on an example. A possibility of quantifying these components proportion in the original signal by analyzing the initial signal correlogram is shown. It is found acceptability between the theoretical-and-probabilistic approach and the frequency one in the analysis of the initial signal. Universality of the frequency approach, which applies to these components mentioned of the initial signal, is also reflected.

Keywords: surface profile, systematic and random components, signal, the frequency approach

Введение. Предопределённый заранее закон кинематического движения инструмента относительно обрабатываемой заготовки предполагает, что в результате обработки будет получена идеальная форма детали со следами режущего инструмента, которые можно определить с помощью кинематических и геометрических соотношений [1]. Например, при обтачивании заготовки в её продольном сечении должен быть ряд дуг, которые соответствуют по форме профилю вершины резца, а расстояние между соседними повторяющимися дугами должно быть равно подаче резца на один оборот заготовки. В этом случае такие предопределённые заранее неровности составляли бы теоретическую шероховатость. Однако наличие динамических процессов на станке нарушает эту предопределённость и реальный профиль поверхности не соответствует идеальной (теоретической) форме, построенной на основании геометрических и

кинематических расчётов. Например, при чистовом точении высота неровностей превышает теоретическую высоту в 2...5 раз, а при тонком точении – в 20 раз.

В этой связи представляется целесообразным разделить все факторы, действующие на формообразование поверхности в процессе резания на две категории: систематические и случайные [1, 2].

Анализ последних исследований и публикаций. В работах [3–6] было установлено, что при механической обработке режущим лезвийным инструментом неровности обработанных поверхностей можно разделить на две категории: периодические и аperiodические (рис. 1).

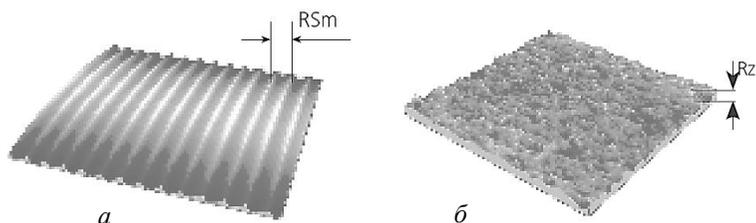


Рисунок 1 – Периодический (а) и аperiodический (б) профиль обработанной поверхности [3]:

RSm и Rz – шаговый и высотный параметры профиля, соответственно

Одной из причин формирования периодической, т.е. систематической, составляющей микронеровностей является след режущего лезвия на обработанной поверхности. Проф. Соколовский А.П. отмечал, что этот след может быть найден исходя из «геометрических соображений» и разделял понятия «поперечная шероховатость» (шероховатость в направлении подачи) и «продольная шероховатость» (в направлении скорости резания) [7]. Причём по данным проф. Соколовского А.П. «геометрический расчёт не учитывает влияния пластической деформации, а также ряда других факторов и в большинстве случаев приводит к результатам, сильно расходящимся с экспериментальными данными». При этом действительная высота неровностей выше расчётной высоты. Однако общий характер зависимостей от подачи действительной и расчётной высоты неровностей одинаков: с увеличением подачи высота неровностей быстро возрастает [7].

При фрезеровании Грановским Г.И. получена формула для «трохоидальной» траектории (trochoidal milling), которая является следствием относительного рабочего движения режущих кромок смежных зубьев фрезы [8]. В систематизированном виде расчёты высоты микронеровностей как детерминированной составляющей, выполненные на «кинематико-геометрической основе» (термин Лоповок Т.С.[1]) , для точения и фрезерования представлены в работе [9].

Очевидно, что в общем случае неровности механически обработанной поверхности содержат одновременно периодическую (детерминированную) и аperiodическую (случайную, недетерминированную) компоненты, которые в совокупности отражаются на топографии поверхности. Известен теоретико-вероятностный подход, в соответствии с которым разделение профиля на детерминированную (периодическую) и случайную (аperiodическую) составляющие даёт возможность математически подойти к решению задачи о разделении шероховатости и волнистости, которые находятся в состоянии суперпозиции, причём за волнистость принять детерминированную часть профиля, а за шероховатость – случайную [1].

Теоретическое обоснование такого подхода основано на гипотезе о присутствии (отсутствии) периодической компоненты в сигнале, характеризующем профилограмму обработанной поверхности [10].

Впервые возможность применения аппарата корреляционного анализа в рамках теоретико-вероятностного подхода для исследования поверхностей была предложена Ю.В. Линником и А.П. Хусу в 1954 году [1]. В их работах предложено интерпретировать профилограмму поверхности как реализацию случайной стационарной функции, которая имеет нормальное распределение. Возможности метода корреляционного анализа для оценки шероховатости и волнистости поверхности были представлены в работах Ю.Р. Витенберга [11-13].

Однако, в имеющейся литературе не освещены такие положения корреляционного анализа, как влияние ограниченного интервала наблюдения на вид корреляционной функции, нет сведений о необходимости и методике проведения центрирования исходной функции, подвергаемой теоретико-вероятностному (статистическому) и частотному анализу, не приведены данные о преемственности между теоретико-вероятностным и частотным подходами к анализу экспериментальных данных, не показана универсальность частотного подхода к системному анализу технологических данных разного назначения. Последнее касается, например, следующих направлений:

- установление взаимосвязи между вибрациями в упругой системе металлорежущего станка и профилограммой обработанной на этом станке поверхности;
- диагностика технологической системы резания по качеству обрабатываемой поверхности на основе анализа частотного спектра сигнала вибраций (виброускорения, виброскорости и виброперемещения) в подсистеме заготовки и режущего инструмента;
- восстановление информации о распределении припуска по сторонам впадин заготовки зубчатого колеса по результатам выборочных измерений припуска тактильным датчиком в отдельных впадинах этой заготовки.

Цель исследования заключается в разработке методики оценки экспериментальных данных на основе концепции разделения суммарной измерительной информации, например, информации характеризующей профиль обработанной поверхности, на систематическую и случайную составляющую этой информации, используя математический аппарат корреляционного анализа.

Представление основного материала. Для последующего анализа воспользуемся следующими общими понятиями. Во-первых, введём понятие сигнала, как способа представления измерительной информации технологического назначения. Как следствие, будем обсуждать математическое описание или математическую модель сигнала, содержащего две составляющие: систематическую (детерминированный сигнал) и случайную (стохастический сигнал). Теперь можно будет говорить о частотных характеристиках детерминированных и стохастических сигналов. Во-вторых, под случайной составляющей сигнала будем понимать некую оценку случайного процесса, под которым в кибернетике понимают математическую абстракцию реального процесса, меняющегося во времени. В третьих, будем говорить о представлении одной и той же информации во временной и частотной области в соответствии с прямым и обратным интегральным преобразованием Фурье, в том числе дискретным и быстрым преобразованием. Наконец, будем приводить используемые математические модели ограниченных во времени (или по координате) сигналов к их «каноническому» виду, принятому в компьютерных технологиях обработки сигналов, посредством «центрирования» соответствующих временных функций, т.е. путём удаления из систематической и случайной составляющей сигналов постоянной составляющей (constant or mean value) и математического ожидания (expected value), соответственно. В этом случае соответствующие моменты для центрированных случайных величин будут называться центральными моментами плотности распределения случайной составляющей сигнала. Первый момент плотности распределения – математическое ожидание сигнала. Второй момент плотности распределения – дисперсия сигнала или среднеквадратическое отклонение его амплитуды от среднего значения [14].

Исходя из этих понятий методика разделения (сегрегации) сигнала, например, сигнала, характеризующего профилограмму поверхности, в соответствие с частотным и теоретико-вероятностным подходом представляется следующей.

1. Профилограмма поверхности $y(x)$ рассматривается как реализация стационарного случайного процесса на длине профилограммы l , т.е. случайного процесса с постоянным математическим ожиданием, равным нулю. Для этого на длине профилограммы l формируется вспомогательная центрированная функция

$$Y(x) = [y(x) - m(x)], \quad (1)$$

где $m(x)$ – средняя арифметическая ордината профилограммы, причём с учётом работы [11], но для дискретного представления

$$m(x) = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} y(i\Delta x)}{n}, \quad (2)$$

2. Реальный профиль поверхности $Y(x)$ представляется в виде суммы двух составляющих: систематической (детерминированной, периодической, регулярной) и случайной (недетерминированной, аperiodической, нерегулярной). При этом систематическая составляющая $Y_{\beta}(x)$ в отличие от случайной составляющей представляет собой полигармоническое колебание, состоящее из суммы простых гармоник, а случайная составляющая $Y_{\gamma}(x)$ представляет собой случайную стационарную функцию с нулевым математическим ожиданием и дисперсией $D_{\gamma} = \sigma_{\gamma}^2$. С учетом обозначений, принятых в работах [1] и [10], математическая модель, например, сигнала профилограммы имеет вид

$$Y(x) = Y_{\beta}(x) + Y_{\gamma}(x) = \sum_{j=1}^m (A_j \cos \omega_j x + B_j \sin \omega_j x) + Y_{\gamma}(x), \quad (3)$$

где A_j, B_j – коэффициенты ряда Фурье; $j = 1, 2, \dots, n$ – порядковые номера гармоник с угловой частотой ω_j ; $Y_{\beta}(x)$ и $Y_{\gamma}(x)$ – систематическая и случайная централированные величины

Видно, что математическая модель (3) естественным образом содержит интегральное преобразование Фурье (частотный подход по Р.В. Хеммингу) для описания систематической (периодической и связанной с волнистостью поверхности) составляющей сигнала. В свою очередь случайная (аperiodическая) составляющая $Y_{\gamma}(x)$ может быть исследована методами теории случайных функций (теоретико-вероятностный подход по А.П. Хусу).

Отметим, что вопрос о вероятностных характеристиках модели (3) для суммарного сигнала $Y(x)$ впервые появился в теории связи, где эту модель называли «смесью гармонического сигнала с шумом» [10].

3. Приведение сигнала исследуемого профиля (профилограммы) к каноническому виду для определения соответствующих центральных моментов плотности распределения этого сигнала. Пользуясь идентификационным свойством корреляционной функции суммарного сигнала, можно применить корреляционный анализ этого сигнала. Это позволит, с одной стороны, выявить скрытую периодичность (hidden periodicity) [15], а с другой, количественно оценить соотношение между систематической и случайной составляющей сигнала по их доле в общей дисперсии этого сигнала [1, 14]. В этом смысле корреляционная функция

суммарного сигнала $Y(x)$ является инструментом идентификации систематической $Y_{\beta}(x)$ и случайной $Y_{\gamma}(x)$ составляющей сигнала $Y(x)$.

Сложность задачи идентификации заключается в выборе интервала трассирования (и соответствующих базовых длин при оценке качества поверхности), поскольку любая экспериментальная последовательность данных имеет конечную длину, причём неважно, длину по времени или по координате. В первом случае (по времени) говорят о сигнале с ограниченным спектром, который не должен содержать постоянную составляющую, ибо частотный спектр (в герцах по оси абсцисс) для постоянной составляющей может быть сложнее спектра переменной части полигармонического сигнала (описывается дискретным рядом Фурье). Во втором случае (по координате) вводят условные частоты, представляющие собой отношение основного шага профиля к шагу n -й гармоники (в миллиметрах) [1]. Как и в первом случае, здесь необходимо удалить из рассмотрения постоянную составляющую сигнала. Поэтому первым шагом в математической обработке сигнала $y(x)$ должно быть удаление постоянной составляющей этого сигнала. Для систематической составляющей сигнала это позволяет удалить из рассмотрения спектр одиночного импульса (длиной l), имеющий сложный характер изменения спектральной плотности сигнала, ограниченного конечным интервалом наблюдения. Для случайной составляющей сигнала $y(x)$ удаление постоянной составляющей позволяет привести случайный процесс к его каноническому виду, в котором участвует центрированная (centered) случайная величина или текущее отклонение случайного процесса от его математического ожидания.

Наши исследования показали, что даже на ограниченной длине трассирования математическое ожидание $m(x)$, представляющее собой результат фильтрации сигнала с отсечкой шага, равной базовой длине измерения шероховатости, является величиной переменной (mean line в европейских стандартах DIN) и является оценкой волнистости обработанной поверхности [16].

Исследования выполнены на современном мехатронном 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. 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. 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 в программном обеспечении измерительной станции T8000 цифровые фильтры позволяют реализовать процедуру разделения длинных и

коротких волн, содержащихся в профиле обработанной поверхности. 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.

Для корреляционного анализа профилограммы выбраны два образца с периодическим (образец №5.1, рис. 3) и аperiodическим (образец №2.1, рис. 5) профилем, полученные при фрезеровании со следующими режимами. Для образца №5.1: глубина резания 0,5 мм, подача на зуб 0,15 мм, частота вращения фрезы 3800 мин⁻¹. Для образца №2.1: глубина резания 0,5 мм, подача на зуб 0,15 мм, частота вращения фрезы 950 мин⁻¹.

В соответствии с алгоритмом поиска автокорреляционной функции R_{xxi} в системе сбора данных NI-DAQmx с программным обеспечением NI-LabVIEW расчёт выполняется по формуле

$$Y_j = \sum_{k=0}^{N-1} X_k X_{j+k}, \quad (4)$$

где $j = -(N-1), -(N-2), \dots, -1, 0, 1, \dots, (N-2), (N-1)$.

При этом определение автокорреляционной функции (рис. 3 и рис. 5) произведено на интервале двойной длины трассирования по алгоритму

$$R_{xxi} = Y_{i-(N-1)}, \quad (5)$$

где $i = 0, 1, 2, \dots, 2(N-1)$.

Такое построение алгоритма расчёта можно пояснить графически (рис. 2), где видно соотношение осей абсцисс с номерами отсчётов j, k, i .

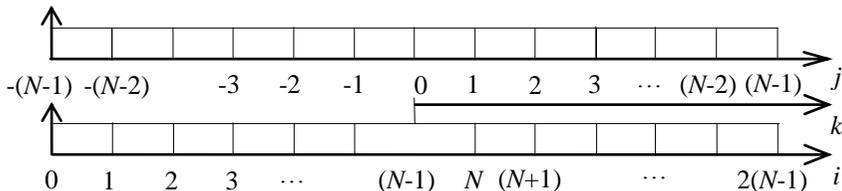


Рисунок 2 – Соотношение осей абсцисс j, k, i для последовательностей дискретных отсчётов при построении автокорреляционной функции

В таблице представлены примеры связи между переменными номерами дискретных отсчётов, позволяющие понять алгоритм вычисления автокорреляционной функции сигнала, содержащего систематическую и случайную составляющие.

Таблица – Соотношение между переменными номерами отсчётов при построении автокорреляционной функции в программе NI-LabVIEW

Переменные номера отсчётов i и j		
i	$J = i - (N-1)$	j
$i = 0$	$j = 0 - (N-1)$	$j = -(N-1)$
$i = 1$	$j = 1 - (N-1)$	$j = N$
$i = 2$	$j = 2 - (N-1)$	$j = N+1$
$i = 3$	$j = 3 - (N-1)$	$j = N+2$
...
$i = N-1$	$j = (N-1) - (N-1)$	$j = 0$
$i = N$	$j = N - (N-1)$	$j = 1$
$i = N+1$	$j = (N+1) - (N-1)$	$j = 2$
...
$i = 2(N-1)$	$j = 2(N-1) - (N-1)$	$j = N-1$

Выполним анализ полученных коррелограмм сигналов, характеризующих первичные профилограммы образцов №5.1 (рис. 3) и №2.1 (рис. 5).

1. Коррелограммы (рис. 4 и рис. 6) построены на удвоенной длине трассирования образцов (длина трассирования $lt = 15$ мм) и являются симметричными на интервале $0 \dots 30$ мм относительно отсчёта $lt = 15$ мм. Это соответствует известному свойству четности автокорреляционной функции $R_{xxi} = K(\tau)$.

2. При абсциссе $lt = 15$ мм автокорреляционная функция (рис.4 и рис.6) принимает своё максимальное значение, равное сумме двух дисперсий: дисперсии $K_{\beta}(0)$ систематической составляющей общего сигнала и дисперсии $K_{\gamma}(0)$ случайной составляющей этого же сигнала, т.е. $K(0) = K_{\beta}(0) + K_{\gamma}(0)$. Для образцов №5.1 и №2.1 эти уравнения имеют вид $3,5 = 2,5 + 1,0$ (рис. 4) и $32,2 = 3,5 + 28,7$ (рис. 6), соответственно. Т.е. систематическая составляющая сигнала в первом случае (образец №5.1, рис.4) в 2,5 раза больше его случайной составляющей. Во втором случае (образец №2.1, рис. 6), наоборот, случайная составляющая сигнала профилограммы превышает его систематическую составляющую в $28,7/3,5 = 8,2$ раза.

3. Шаг волны (0,63 мм) исходного суммарного сигнала для образца №5.1 (рис. 3) совпадает с шагом волны автокорреляционной функции для этого же образца, т.е. $T_{\beta 1} = T_{\beta 2} = 0,63$ мм (рис. 4). В тоже время для образца №2.1 (рис. 5)

систематическая составляющая сигнала, связанная с его периодичностью, не выражена, является скрытой и характеризуется переменными шагами $T_{\beta 1}=4,4$ мм и $T_{\beta 2}=1,0$ мм (рис. 6).

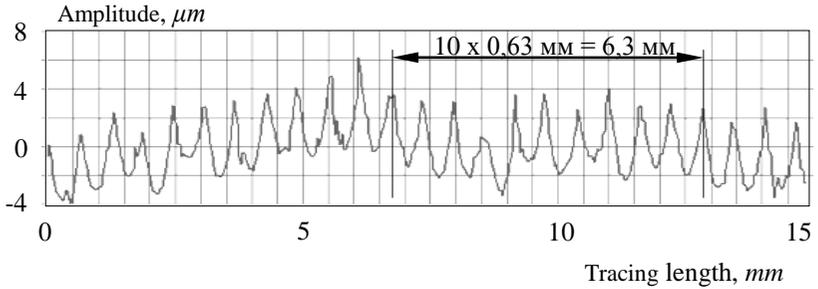


Рисунок 3 – Профилграмма поверхности образца 5.1 после фрезерования

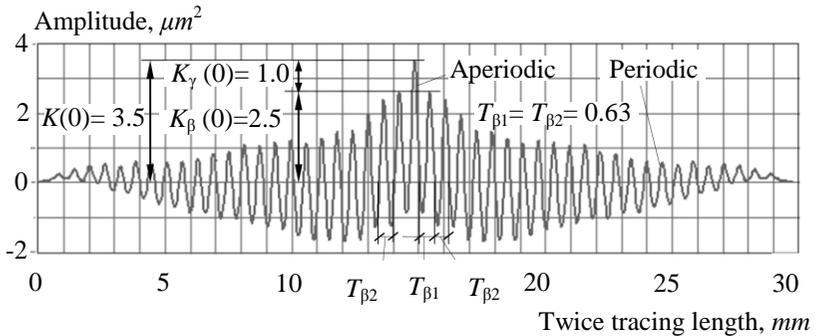


Рисунок 4 – Коррелограмма образца 5.1

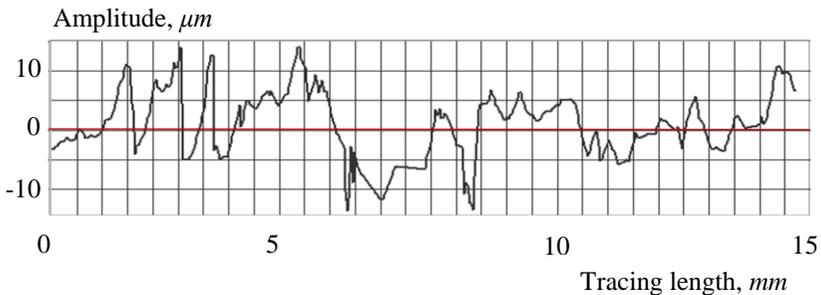


Рисунок 5 – Профилграмма образца 2.1 после фрезерования

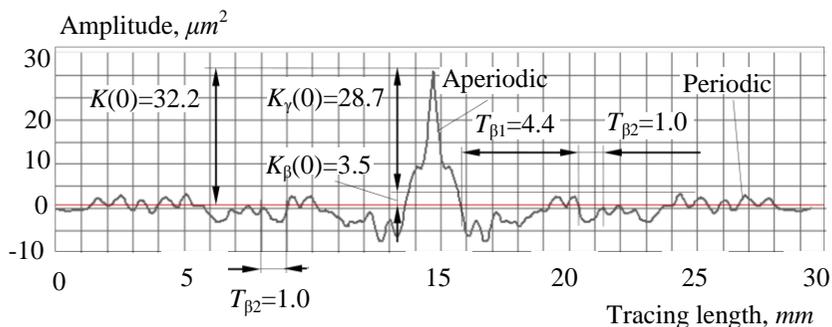


Рисунок 6 – Коррелограмма образца 2.1

Выводы

1. Разработана и апробирована на примерах методика идентификации систематической и случайной составляющей сигнала профиля обработанной поверхности и других экспериментальных данных, заключающаяся в приведении этого сигнала (данных) к центрированному виду путём удаления постоянной составляющей этого сигнала (данных) из суммарного сигнала – результата измерения.

2. Показано, что первым шагом обработки последовательности экспериментальных данных является «центрирование» суммарного сигнала путём удаления из него постоянных компонент, входящих в систематическую и случайную составляющие этого сигнала. Для полученного центрированного суммарного сигнала появляется возможность применения частотного и теоретико-вероятностного подхода, соответственно, для обработки систематической и случайной составляющей суммарного сигнала.

3. Показана преемственность между частотным и теоретико-вероятностным подходом к обработке суммарного сигнала измерения, заключающаяся в возможности определения спектральной плотности (непрерывный частотный спектр) случайной составляющей сигнала через его автокорреляционную функцию: спектральная плотность случайного процесса соответствует прямому преобразованию Фурье корреляционной функции этой случайной составляющей. Имеется также возможность для соответствующего обратного преобразования Фурье, позволяющего получать автокорреляционную функцию при наличии спектральной плотности случайной составляющей сигнала. Это усиливает возможности частотного подхода, так как расширяет область его применения к изучению не только систематической и случайной составляющей суммарного сигнала.

4. Показана универсальность технологических приложений частотного и теоретико-вероятностного подходов в современных компьютерных

технологиях обработки экспериментальных данных. Один и тот же математический аппарат частотного преобразования Фурье можно использовать в разных технологических приложениях для анализа систематической и случайной составляющих суммарного сигнала, например, для анализа:

- профилограммы профиля обработанной поверхности;
- вибраций при формообразовании указанного профиля при механической обработке (например, фрезеровании);
- распределения припуска по левой и правой сторонам впадин зубчатого колеса перед зубошлифованием на станке с ЧПУ.

Список использованных источников: 1. *Лоповок Т.С.* Волнистость поверхности и её измерение / *Т.С. Лоповок.* – М.: Изд-во стандартов, 1973. – 184 с. 2. Приборы для автоматического контроля в машиностроении / *С.С. Волосов, Е.И. Педь.* – Учебное пособие для вузов. Изд. 2-е. – М.: Изд-во стандартов, 1975. – 336 с. 3. Roughness measuring systems from Jenoptik – Surface texture parameters in practice 06 /2013 · 10037109 Copyright© JENOPTIK Industrial Metrology Germany GmbH. 4. *Карташов А.И.* Шероховатость поверхности и методы её измерения / *А.И. Карташов.* – М.: Изд-во гос. комитета стандартов, мер и измерительных приборов СССР, 1964. – 163 с. 5. *Дунин-Барковский И.В.* Измерения и анализ шероховатости поверхности, волнистости и некруглости поверхности / *И.В. Дунин-Барковский, А.Н. Карташова.* – М.: Машиностроение, 1978. – 232 с. 6. *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. 7. *Соколовский А.П.* Расчёты точности обработки на металлорежущих станках / *А.П. Соколовский.* – М.- Л.: Гос. науч.-техн. изд-во машиностр. литературы, 1952. – 288 с. 8. *Грановский Г.И.* Резание металлов: Учебник для машиностр. и приборостр. спец. вузов / *Г.И. Грановский, В.Г. Грановский.* – М.: Высш. шк., 1985. – 304 с. 9. *Армарего И. Дж.* Обработка металлов резанием / *И. Дж. Армарего, Р.Х. Браун.* Пер. с англ. *В.А. Пастунова.* – М.: Машиностроение, 1977. – 325 с. 10. *Хусу А.П.* Шероховатость поверхностей (теоретико-вероятностный подход) / *А.П. Хусу, Ю.П. Витенберг, В.А. Пальмов.* – М.: Гл. ред. физико-математической литературы изд-ва «Наука», 1975. – 344 с. 11. *Витенберг Ю.П.* Оценка шероховатости поверхности с помощью корреляционных функций / *Ю.П. Витенберг* // Вестник машиностроения. – 1969. – №1. – С.55-57. 12. *Витенберг Ю.П.* Корреляционные характеристики шероховатости поверхности и их зависимость от технологических факторов / *Ю.П. Витенберг* // Технология машиностроения. – 1970. – №2. – С.57-59. 13. *Витенберг Ю.П.* Оценка волнистости поверхности с помощью корреляционных функций / *Ю.П. Витенберг* // Вестник машиностроения. – 1971. – №8. – С.58-60. 14. Измерения в промышленности. Справ. изд. Под ред. *П. Профоса.* Пер. с нем. – М.: Металлургия, 1980. – 648 с. 15. *Серебрянников М.Г.* Выявление скрытых периодичностей / *М.Г. Серебрянников, А.А. Первозванский.* – М.: Наука, 1965. – 244 с. 16. *Лищенко Н.В.* Частотные характеристики профилограммы поверхности и вибраций при её обработке / *Н.В. Лищенко* // Високи технології в машинобудуванні: зб. наук. праць. – Харків, НТУ "ХПИ", 2015. – Вип. 1(25). – С.94-108.

Bibliography (transliterated): 1. *Lopovok T.S.* Volnistost' poverkhnosti i ee izmerenie / *T.S. Lopovok.* – М.: Izd-vo standartov, 1973. – 184 s. 2. Pribory dlya avtomaticheskogo kontrolya v mashinostroenii / *S.S. Volosov, E.I. Ped'*. – Uchebnoe posobie dlya vuzov. Izd. 2-e. – М.: Izd-vo standartov, 1975. – 336 s. 3. Roughness measuring systems from Jenoptik – Surface texture parameters in practice 06 /2013 · 10037109 Copyright© JENOPTIK Industrial Metrology Germany GmbH. 4. *Kartashov A.I.* Sherokhovatost' poverkhnosti i metody ee izmereniya / *A.I. Kartashov.* – М.: Izd-vo gos. komiteta standartov, mer i izmeritel'nykh priborov SSSR,

1964. – 163 s. **5.** *Dumin-Barkovskiy I.V.* Izmereniya i analiz sherokhovatosti poverkhnosti, volnistosti i nekruglosti poverkhnosti / *I.V. Dumin-Barkovskiy, A.N. Kartashova.* – M.: Mashinostroenie, 1978. – 232 s.

6. *Tabenkin A.N.* Sherokhovatost', volnistost', profil'. Mezhdunarodnyy opyt / *A.N. Tabenkin, S.B. Tarasov, S.N. Stepanov.* Pod red. kand. tekhn. nauk *N.A. Tabachnikovoy.* – SPb.: Izd-vo Politekh. un-ta, 2007. – 136 s.

7. *Sokolovskiy A.P.* Raschety tochnosti obrabotki na metallorazhushchikh stankakh / *A.P. Sokolovskiy.* – M.-L.: Gos. nauch.-tekhn. izd-vo mashinostr. literatury, 1952. – 288 s. **8.** *Granovskiy G.I.* Rezanie metallov: Uchebnik dlya mashinostr. i priborostr. spets. vuzov / *G.I. Granovskiy, V.G. Granovskiy.* – M.: Vyssh. shk., 1985. – 304 s. **9.** *Armarego I. Dzh.* Obrabotka metallov rezaniem / *I. Dzh. Armarego, R.Kh. Braun.* Per. s angl. *V.A. Pastunova.* – M.: Mashinostroenie, 1977. – 325 s. **10.** *Khusu A.P.* Sherokhovatost' poverkhnostey (teoretiko-veroyatnostnyy podkhod) / *A.P. Khusu, Yu.R. Vitenberg, V.A. Pal'mov.* – M.: Gl. red. fiziko-matematicheskoy literatury izd-va «Nauka», 1975. – 344 s. **11.** *Vitenberg Yu.R.* Otsenka sherokhovatosti poverkhnosti s pomoshch'yu korrelyatsionnykh funktsiy / *Yu.R. Vitenberg* // Vestnik mashinostroeniya. – 1969. – №1. – S.55-57. **12.** *Vitenberg Yu.R.* Korrelyatsionnye kharakteristiki sherokhovatosti poverkhnosti i ikh zavisimost' ot tekhnologicheskikh faktorov / *Yu.R. Vitenberg* // Tekhnologiya mashinostroeniya. – 1970. – №2. – S.57-59. **13.** *Vitenberg Yu.R.* Otsenka volnistosti poverkhnosti s pomoshch'yu korrelyatsionnykh funktsiy / *Yu.R. Vitenberg* // Vestnik mashinostroeniya. – 1971. – №8. – S.58-60. **14.** Izmereniya v promyshlennosti. Sprav. izd. Pod red. P. Profosa. Per. s nem. – M.: Metallurgiya, 1980. – 648 s. **15.** *Serebrennikov M.G.* Vyyavlenie skrytykh periodichnostey / *M.G. Serebrennikov, A.A. Pervozvanskiy.* – M.: Nauka, 1965. – 244 s. **16.** *Lishchenko N.V.* Chastotnye kharakteristiki profilogrammy poverkhnosti i vibratsiy pri ee obrabotke / *N.V. Lishchenko* // Visoki tekhnologii v mashinobuduvanni: zb. nauk. prats'. – Kharkiv, NTU "KhPI", 2015. – Vip. 1(25). – S.94-108.