

УДК 004.436.2

А.А. Гагарин, В.С. Детлинг, И.В. Мирошниченко, А.В. Сарибога

## **АПРОКСИМАЦИЯ ТРЕНДА ВОЛНИСТОСТИ ПРОТЯЖЕННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ВЫЧИСЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ШЕРОХОВАТОСТИ**

*Аннотация:* Показана возможность двумерного анализа шероховатости при перемещении по независимой линейной базе индукционных контактных датчиков при измерении ординат шероховатости для аппроксимации тренда волнистости по результатам вычисления параметров шероховатости простых поверхностей протяженных изделий.

*Ключевые слова:* волнистость, шероховатость, математическая модель, нестационарный случайный процесс, интегрированный измерительный канал

### **Постановка проблемы**

В настоящее время основой технического прогресса и экономического благосостояния страны является машиностроение, включающее авиационную и космическую промышленность (Aviation Problem area – APRAR). Необходимость модернизации станкостроения, являющегося ядром в этих областях и определяющем его качественный уровень, требует использования новых информационных и информационно-сетевых технологий проектирования, планирования и управления полным жизненным циклом изделия. Информационные технологии (ИТ), представляющие собой комплекс взаимосвязанных научных и инженерных дисциплин, используют методы организации и взаимодействия с людьми и производственным оборудованием, их практические приложения, а также связанные со всем этим социальные, экономические и культурные проблемы [1]. ИТ требуют сложной подготовки, больших первоначальных затрат и наукоемкой вычислительной техники и поэтому их введение должно начинаться с создания математического обеспечения, формирования информационных потоков в системах подготовки специалистов, занятых обработкой и хранением информации [2].

### **Цель работы**

Контроль качества современных протяженных объектов APRAR [3] требует использования специализированных систем обработки экспериментальных данных (СОЭД-К), при проектировании которых ИТ определяются как триединство “*математическая модель–алгоритм–программа*”. Математические модели (ММ), описывающие состояния APRAR, принято называть *статистическими*, а описывающие последовательности этих состояний – *динамическими* [4]. В многофункциональных и многоканальных

аналого-цифровых СОЭД-К с интегрированными измерительными каналами обработка результатов измерения выполняется центральным компьютером СОЭД-К, что вносит дополнительные погрешности. Поэтому оценка погрешностей вычисления характеристик статических ММ по результатам измерения, погрешностей классификации динамических моделей, включающих и статические, является одной из основных целей при проектировании интегрированных в СОЭД-К каналов измерения ординат профиля шероховатости и последующих вычислений статистических показателей качества поверхности изделий APRAR.

### Анализ решений

Теоретической основой повышения точности вычисления статистических характеристик случайного процесса является *комплексирование статистических измерений* числовой характеристики (ее оценки), принятой за основную, за счет одновременного измерения одной (или более) дополнительной числовой характеристики, имеющей с основной известную статистическую или детерминированную связь и используемой для уменьшения погрешности вычисления основной числовой характеристики, причем в каналах измерения основной или дополнительной числовой характеристик могут использоваться как прямые, так и косвенные, совокупные и совместные измерения. Примером комплексирования статистических измерений могут служить косвенные измерения дальности по времени прихода отраженного сигнала импульсным радиолокатором [5], при котором погрешность измерения дальности может быть уменьшена за счет измерения в дополнительном канале доплеровского сдвига частоты заполнения зондирующего импульса, вычисления радиальной составляющей скорости движения цели, ее интегрирования и суммирования с дальностью, полученной в канале прямых измерений дальности по времени прихода отраженного импульса. В активной (локационной) гидроакустике и в медицинских ультразвуковых исследованиях (УЗИ) комплексирования при статистических измерениях является повышение точности по сравнению с одноканальной СОЭД. Это обусловлено тем, что комплексированная одноканальная СОЭД оказывается как бы многоканальной (двух и более) по отношению к каждой вычисляемой характеристике. При этом характеристики чаще всего связаны статистически и при объединении каналов СОЭД суммирование полезных измерительных сигналов оказывается близким к арифметическому, а помех – к геометрическому, в результате чего увеличивается отношение сигнал/помеха. В машиностроении и APRAR с использованием комплексирования возможно вычисление различных параметров качества поверхностей. Показателями качества поверхности изделий являются геометрические характеристики, критерием для разграничения которых служит отноше-

ние шага неровностей  $S$  к их полной высоте  $R$ : при  $S/R$  более 1000 – макронеровности (отклонения формы), определяемые допусками на изготовление; при  $S/R = 50 \dots 1000$  – волнистость и при  $S/R$  менее 50 – шероховатость. Шероховатость реальной поверхности оценивается по высоте  $y$  неровностей в нормальном поперечном сечении образцов в пределах линейной базовой длины  $l$ . Возникновение волнистости, представляющей совокупность периодически повторяющихся неровностей, у которых расстояния между смежными возвышенностями или впадинами превышают базовую длину  $l$ , связано с динамическими процессами в изделиях APRAR, вызываемыми потерей устойчивости производственных систем и при испытаниях протяженных изделий. Шероховатость представляется ММ в виде реализации случайного процесса  $\xi(l)$ , а нормированные параметры шероховатости вычисляются как статистические характеристики по результатам измерений ординат  $y$  реализаций  $\xi(l)$ . Так как волнистость занимает промежуточное положение между отклонениями формы и шероховатостью поверхности, то необходима оценка возможности формирования ММ волнистости в виде  $\xi(L)$ , выбор интервала между линейными базами измерений ординат шероховатости для аппроксимация тренда волнистости протяженных поверхностей и оценка погрешности динамической модели показателя качества поверхности.

Шероховатость поверхности по ГОСТ 2789–73 [6], а также ISO 4287 и DIN 4768, представляется ММ в виде реализации случайного процесса  $\xi(l)$ , а нормированные параметры шероховатости вычисляются как статистические характеристики по результатам измерений ординат  $y$  реализации  $\xi(l)$  – неровностей профиля (рис. 1) в сечении плоскостью, нормальной к базовой поверхности в пределах  $l$  – линейной базовой длины. Для оценки и нормирования шероховатости установлено 6 параметров ММ: три высотных –  $Ra$  (предпочтительный),  $Rz$ , и  $R_{max}$ , два шаговых –  $S_m$  и  $S$  и  $tp$  – параметр относительной опорной длины профиля [7].

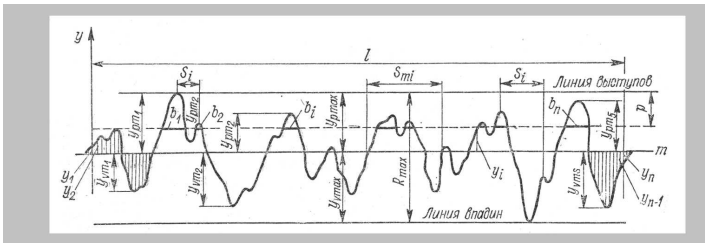


Рис. 1 – Характеристики профиля шероховатости по ГОСТ 2789–73

$$\text{Предпочтительный статистический параметр } Ra = \frac{1}{l} \int_0^l |y| dx$$

представляет собой среднюю высоту неровностей профиля на линейной базовой длине  $l$  и вычисляется как среднее арифметическое значение абсолютных отклонений ординат  $y$  всех  $n$  неровностей профиля по алгоритму  $Ra = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y|$  (1) реализаций случайного процесса  $\xi_0(l)$ , центрированного относительно прямой базовой линии  $m$  (рис. 1).  $Rz$  – высота неровностей  $y$  профиля, вычисляемая по десяти точкам как сумма средних абсолютных значений высот пяти наибольших выступов  $y_{pmi}$  и глубин  $y_{vmi}$  пяти наибольших впадин профиля в пределах  $l$ . Параметр  $S_i$  характеризует взаимное расположение (расстояние) характерных точек неровностей (максимумов) профиля,  $S_{mi}$  – точек пересечения профиля со средней линией  $m$  (нулей профиля). Параметр  $t_p$  аналогичен функции распределения выбросов  $\xi(t)$  процессов над порогом [8] и позволяет судить о фактической площади контакта поверхностей на заданном уровне  $p$ . Все параметры шероховатости в аналого-цифровых системах вычисляются для центрированных  $\xi_0(l)$  относительно линии  $m$  для уменьшения объёмов выборки результатов измерения ординат  $y$ .

В машиностроении и других отраслях промышленности шероховатость оказывает влияние на точность изготовления изделий, оснастки и инструмента. В APRAR особый интерес представляют зависимости между шероховатостью и волнистостью поверхности и эксплуатационными показателями, прежде всего, надёжностью. В ответственных случаях, например, в связи с направлением относительного скольжения сопряженных деталей или с направлением движения струи жидкости или газа по поверхности детали или всего изделия, характерных для изделий APRAR вводится параметр DIR, показывающий направление неровностей и следов обработки. При совпадении направления скольжения либо движения струй газов или жидкостей с направлением неровностей на поверхностях деталей их износ уменьшается и достигает минимума. Это должно учитываться при проектировании изделий APRAR. Согласно рекомендации СЭВ РС3951-73 волнистость поверхности – это совокупность периодически повторяющихся неровностей, у которых расстояния между смежными возвышенностями или впадинами превышают базовую длину для имеющейся шероховатости поверхности. Возникновение волнистости в процессе производства связано с динамическими процессами, вызываемыми потерей устойчивости системы станок - приспособление - инструмент - деталь и выражающимися в возникновении вибраций. Высота волнистости вычисляется аналогично  $Rz$  как среднее арифметическое из пяти ее значений, определенных на длине  $L$  участка измерения. Придание поверхностям специальных свойств повышает показатели качества изделий APRAR: аэродинамическое и жидкостное трение; износ при скольжении и качении; контакт-

ную жесткость; прочность прессовых соединений; отражательную способность в оптическом и радиотехническом диапазонах; виброустойчивость и прочность при циклических нагрузках; износостойкость при переменных нагрузках; коррозионную стойкость; адгезию различных покрытий и т.д.

### Основное содержание

Работа посвящена обоснованию возможности формирования динамической ММ шероховатости в виде оценки параметров волнистости. Анализ исследований [9] по проектированию аналогоцифровых многоканальных и многофункциональных СОЭД-К показывает, что в статических ММ могут не получить отражения не формализуемые черты реальности, как по субъективным, так и по объективным причинам, что приводит к увеличению погрешности классификации – несоответствию реального процесса приписываемой ему ММ. Развитие метрологии как научной дисциплины определяется эволюцией взглядов на виды погрешностей и принципы их классификации и характеризуется увеличением числа и сложности измерительных задач при совершенствовании технической базы СОЭД-К. Поэтому статические ММ реальной APRAR требуют корректировки из-за текущих изменений во времени как в самой APRAR, так и в технологической цепи всего ЛТ (проектирования, изготовления, испытаний, эксплуатации, модернизации и утилизации), смене элементной базы СОЭД-К и т.п., что приводит к необходимости формирования динамических ММ. Статическими ММ шероховатости, описывающими состояния поверхности, могут быть стационарные случайные процессы с конечными значениями случайных отклонений ординат профиля шероховатости с законами распределения: усечённым нормальным, равномерным и Симпсона. Для идентификации этих процессов в машиностроении достаточно вычисления первых четырех моментов: математического ожидания – ординаты средней линии профиля шероховатости, равной нулю для централизованного процесса; второго центрального момента – значения  $Ra$ ; третьего начального момента – асимметрии закона распределения и четвертого центрального момента – погрешности вычисления  $Ra$ .

На практике всегда есть базы знаний по характеристикам качества изделий: шероховатости, волнистости и др., основанные на предыдущем опыте, физической трактовке задачи или даже интуиции, которые относятся к задачам выбора ММ профиля поверхности. Отличие от нуля математического ожидания и третьего момента оценки шероховатости свидетельствует о нестационарности процесса  $\xi(l)$ , что даёт возможность формирования динамической ММ шероховатости в виде волнистости поверхности протяженного изделия APRAR на длине  $L$ . Положение средней линии (жирная линия на рис. 2) может быть определено так же,

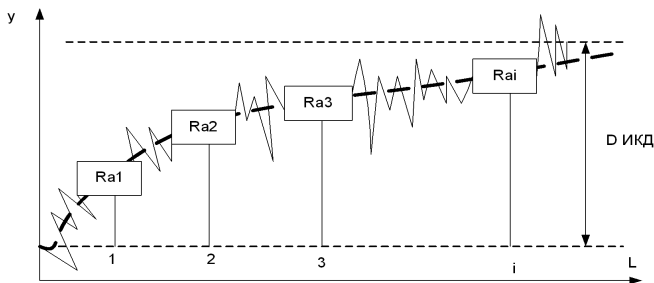


Рис. 2 – Тренд базовой линии  $m$  при вычислении  $Ra$  на длине  $L$  протяженного изделия

как и для средней линии  $m$  профиля шероховатости (рис. 1) по результатам вычислений  $Ra1 \dots Rai$  в дискретных ( $1 \dots i$ ) точках (рис. 2), но без центрирования исходного  $\xi(l)$ . В аналого-цифровых СОЭД-К с интегрированными УКИШ принципиально возможно вычисление  $Ra$  не только для образцов с базовой длиной  $l$  порядка 1–7 мм [10], но и для простых нелинейных поверхностей, сечение которых в плоскости измерения представляет прямую линию, что характерно для протяженных объектов. В таких СОЭД-К при реализации алгоритма (1) вычисления  $Ra$  может быть применена *внешне-внутренняя* адаптация [11] для уменьшения суммарной погрешности  $\delta_{\Sigma}$  СОЭД-К. По “текущей гистограмме” выбирается минимальное число разрядов АЦП в зависимости от  $W(x)$  для получения требуемой  $\Delta\Theta^*[x(t)]$ , т.е. производится адаптация [12]. При этом должно производиться непрерывное вычисление положения средней линии  $m$  (рис. 2), по изменению которого можно судить о нелинейности процесса – т.е. о погрешности классификации по принятой ММ процесса  $\xi(l)$ . Наличие не дифференцируемых функции модуля в алгоритме (1) вычислений  $Ra$  приводит к осложнениям при оценивании погрешности алгоритма. Но так как массив  $\{y^*\}$  состоит из большого числа элементов, математическое ожидание погрешности которых примерно равно нулю и в общем случае профиль шероховатости можно считать реализацией стационарного эргодического  $\xi(l)$  (рис. 1), то количество точек, лежащих выше и ниже  $m$ , примерно одинаковое. Поэтому вычисление модуля, приводящее к инверсии знака погрешности для точек, лежащих ниже средней линии, не приводит к существенному изменению погрешности и при оценке погрешности алгоритма погрешностями вычисления модуля в (1) можно пренебречь. При автоматизации производства изделий APRAR предпочтение отдаётся СОЭД-К с интегрированными УКИШ на базе устойчивых к ударным перегрузкам и воздействию внешних магнитных полей аналоговых индукционных контактных датчиков (ИКД), усили-

телями, фильтрами и АЦП с последующей обработкой цифровых ОМД процессором СОЭД-К по алгоритму (1) в режиме реального времени [3]. В таких УКИШ используются ИКД с независимой опорой (Traversing system of an instrument with the external reference datum), в которой ИКД не опирается на шероховатую поверхность, а перемещается по внешней измерительной базе, сохраняя ориентацию постоянной, при этом поверхность не действует на ИКД и не влияет на его траекторию. Дифференциальная схема включения ИКД и синхронное детектирование, при котором выходной сигнал ИКД перемножается с сигналом дополнительного опорного генератора, позволяют различать перемещение иглы ИКД в обе стороны от непрерывно вычисляемой средней линии  $m$  профиля (рис. 1) и увеличить динамический диапазон  $D$  ИКД примерно в два раза [12]. Для получения значений  $Ra$  должно непрерывно вычисляться положение средней линии  $m$  (рис. 1) по значениям ординат  $y$  профиля. При вычислении среднего значения  $n$  элементов массива  $\{y^*\}$  СКО случайной составляющей погрешности среднего значения уменьшается в  $\sqrt{n}$  раз при выборе длины трассы и скорости перемещения датчика так, чтобы массив  $\{y^*\}$  ординат  $y$  профиля состоял не менее, чем из 100 элементов [8]. Тогда погрешность вычисления ординаты  $m$  средней линии профиля будет не менее чем на порядок меньше погрешности измерений ординат  $y$  профиля. Поскольку при вычислениях из элементов массива  $\{y^*\}$  вычитается среднее значение, то погрешностью вычитаемого можно пренебречь, так как она примерно на порядок меньше, чем погрешность уменьшаемого. На протяженных объектах APRAR необходимо измерение ординат шероховатости на нелинейных поверхностях. При анализе шероховатости в плоскости  $XZ$  трассу базовой длины  $L$  можно рассматривать как плоскую кривую линию  $a$  или как траекторию движения точки, обкатывающей эту кривую без скольжения. Движение точки вдоль кривой  $a$  связано с непрерывным изменением расстояния  $S$ , на которое удалена точка от начального положения и угла  $\alpha$  поворота касательной  $t$  относительно начального положения. Множеством центров кривизны является кривая линия, называемой *эволютой* данной кривой, а кривая  $a$  по отношению к своей эволюте называется *эвольвентой*. При анализе шероховатости протяженных объектов в APRAR на участках произвольной кривой  $S_x$  по оси  $X$  с соотношением радиуса кривизны  $r_k$  и базовой длины порядка  $L = 100r_k \geq l$  (рис. 2) эта *эвольвента* заменяется ломаной, состоящей из  $i$  участков базовой длины, количество которых выбираются по общим правилам [12]. В таких многоканальных СОЭД-К УКИШ производят измерение ординат шероховатости протяженных изделий APRAR одновременно на участках кривой  $S_x$  по оси  $X$  и по оси  $Z$  вдоль кривой  $S_z$ , по результатам этих измерений формируются массивы  $\{y_y^*\}$  и  $\{y_z^*\}$  и вычисляются  $Ra1 \dots Rai$  в дискретных  $(1 \dots i)$  точках. При

этом величина базовой длины может изменяться от стандартной, порядка 5–7 мм [6], до нескольких десятков мм при перемещении ИКД по независимой линейной базе  $L$  при проведении двумерного анализа шероховатости, по результатам которого может быть дополнительно вычислена волнистость простых поверхностей, или, иначе говоря, осуществлено комплексирование статистических измерений. Поэтому процедура измерения ординат  $\{y^*\}$  не центрированного  $\xi(l)$  при использовании метода касательных плоскостей для простых поверхностей может занимать значительное время, определяемое кривизной  $k$  или топологией (видом эволют) изделий APRAR. Например, внешнее проектирование планера транспортного самолета [5] методом конечно-элементной модели (КЭМ) может занимать время от 2 до 5 лет, а время анализа поверхностей – от 1 до 6 месяцев, в связи с чем приобретает значение концепция обобщенной точности СОЭД-К с интегрированными УКИШ, позволяющая уменьшение объема выборки для формирования массивов  $\{y_y^*\}$  и  $\{y_z^*\}$  при проведении двумерного анализа качества поверхностей протяженных изделий APRAR.

### Выводы

Показана возможность комплексирования статистических измерений при перемещении по независимой линейной базе индукционных контактных датчиков с расширенным динамическим диапазоном измерения параметров шероховатости. Обоснована возможность двумерного анализа шероховатости для аппроксимация тренда волнистости по результатам вычисления параметров шероховатости простых поверхностей протяженных изделий .

### Литература

1. Гагарин А.А. CALS-технологии при реализации проекта управления образовательным процессом в высшей технической школе / А.А. Гагарин, А. В. Мирошниченко, И. В. Мирошниченко // Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво. – Луцький національний університет: науковий журнал № 11, 2013 р. – С. 183–186
2. Детлинг В.С. Вибір параметрів адаптивних систем обробки експериментальних даних / В.С. Детлинг, І.В. Мірошниченко, В.І. Павленко, В.О. Тихоход // Адаптивні системи автоматичного управління: міжвідомчий науково-технічний збірник. – Київ: Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут”. – 2012.– Вип. 20(40). – С. 41–51
3. Детлинг В.С. Інформаційно-вимірювальна система забезпечення якості шорсткості поверхні / В.С. Детлинг, В.П. Зинченко, И. В. Мирошниченко // Вісник Черкаського Державного технологічного університету, Спецвипуск, 2006, – С. 135–137.



4. *Детлинг В.С.* Математическая модель шероховатости протяженных объектов / *В.С. Детлинг, В.П. Зинченко, И.В. Мирошниченко* // Шоста науково-технічна конференція Приладобудування 2007: стан и перспективи: збірник тез доповідей, Київ, 24–25 квітня 2007 р., С. 151–152.
5. *Зинченко В.П.* Алгоритм оптимального проектирования самолетов. / *В.П. Зинченко, В. В. Борисов, И. В. Мирошниченко* // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля Науковий журнал № 13(167) 2011 р. С. 70–74.
6. Межгосударственный стандарт ГОСТ 2789-73 Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики. Госстандарт СССР, 23 апреля 1973 г. N 995. Дата введения 1 января 1975 г. без ограничения срока действия (ИУС 7–80)
7. Информационные технологии Режим доступа <http://konmaksim.narod.ru/Index.html>
8. *Норенков И.П.* Информационная поддержка наукоёмких изделий (CALS-технологии) / *И.П. Норенков, П.К. Кузьмич* – М.: Изд. МВТУ им. Н.Э Баумана, 2002 – 234 с.
9. *Воллернер Н.Ф.* Аппаратурный спектральный анализ сигналов / *Н.Ф. Воллернер* – М: Советское Радио, 1977, 207 с.
10. *Тихонов В. И.* Выбросы траекторий случайных процессов / *В.И. Тихонов, В.И. Хиленко* // – М.: Наука, 1987 – 303 с.
11. *Вентцель Е.С.* Теория вероятностей / *Е.С. Вентцель* – М.: Наука, 1969– 576 с.

Отримано 29.03.2014 р.