

Мирошниченко И. В.

# СТАТИЧЕСКИЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ШЕРОХОВАТОСТИ ПРОТЯЖЕННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

*Показана возможность формирования динамической математической модели шероховатости — волнистости для простых поверхностей по результатам оценок статических математических моделей шероховатости поверхностей, полученных по результатам измерений ординат профиля шероховатости индукционными контактными датчиками с расширенным динамическим диапазоном, перемещающихся по независимой линейной базе.*

**Ключевые слова:** статическая математическая модель, динамическая математическая модель, шероховатости, волнистость.

## 1. Введение

При контроле качества поверхности протяженных изделий авиационной и космической промышленности (Aviation Problem area — APRAR) на всех этапах их жизненного цикла (LT — Life cycle Time) используются системы обработки экспериментальных данных (СОЭД-К). При проектировании многоканальных и многофункциональных аналого-цифровых СОЭД-К необходима математическая модель (ММ) входных сигналов  $x(t)$  интегрированных программно управляемых адаптивных измерительных каналов (ПУАИК), распределенных в пространстве.

Основными показателями качества поверхности изделий APRAR, кроме макронеровностей (допусков на изготовление), являются микронеровности — шероховатость (ГОСТ 2789-73) и волнистость, критерием для разграничения которых служит отношение шага неровностей  $S$  к их полной высоте  $R$ .

Числовые характеристики статической ММ шероховатости, описывающей состояние реальной поверхности в пределах базовой длины  $l$ , вычисляются по результатам измерения ординат  $y$  профиля шероховатости в нормальном поперечном сечении. Характеристики волнистости могут быть вычислены в результате аппроксимации статических ММ, так как описывают последовательности состояний на различных участках шероховатой поверхности и являются динамическими ММ шероховатости [1].

Статическими и динамическими ММ шероховатости и волнистости чаще всего чаще принимаются случайные процессы  $\xi(t)$  и поэтому в них могут не получить отражения некоторые неформализуемые черты реальности по субъективным и объективным причинам, что приводит к появлению погрешности классификации — несоответствию реального  $x(t)$  приписываемой ему ММ в виде  $\xi(t)$ . Этим обосновывается актуальность проведенного исследования.

## 2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Исследования [2–8] по проектированию аналого-цифровых многоканальных и многофункциональных

СОЭД-К показывает, что даже статические ММ поверхностей реальных APRAR требуют корректировки из-за текущих изменений во времени как в самой APRAR, так и в технологической цепи всего LT (внешнего и внутреннего проектирования, изготовления, испытаний, эксплуатации, модернизации и утилизации), смене элементной базы СОЭД-К и т. п.). Это приводит к необходимости формирования динамических ММ, описывающих последовательности состояний поверхностей на всем LT [3] изделий APRAR, что увеличивает время проектирования.

Для ускорения процесса проектирования СОЭД-К применяются CALS-технологии непрерывной информационной поддержки (Continues Acquisition and Life cycle Support — CALS) всего LT изделия, длительность которого для воздушного судна на сегодняшний день составляет 30–35 лет [9]. На этапе внутреннего проектирования изделия APRAR производится проектирование СОЭД-К. В СОЭД-К измерение ординат  $y$  профиля шероховатости производится в интегрированном ПУАИК, в котором, после проведения адаптации, производится однородное масштабирование (ОМД данных — Uniform scaling) результатов  $y$  измерения и передача ОМД через канал связи в центральный компьютер СОЭД-К, где формируется база данных  $\{y^*\}$  для вычисления оценок параметров ММ. Такое построение ПУАИК вносит дополнительные аппаратные погрешности.

## 3. Объект, цель и задачи исследования

Объектом исследования является адаптивный канал измерения ординат шероховатости, интегрированный в многоканальную СОЭД-К.

Целью исследования является формирование математических моделей шероховатости и волнистости, необходимых при проектировании систем контроля качества поверхности в авиационной промышленности. Для достижения поставленной цели необходимо произвести анализ погрешностей измерений и вычислений оценок статических ММ шероховатости и динамических ММ шероховатости в виде волнистости, необходимых для оценки суммарной погрешности СОЭД и погрешности классификации.

Задачей исследования является разработка методов повышения точности систем обработки экспериментальных данных контроля качества (СОЭД-К) с интегрированными (ПУАИК) на базе индукционных контактных датчиков (ИКД) с расширенным диапазоном измерений ординат шероховатости, устойчивых к ударным перегрузкам и воздействию внешних магнитных полей.

#### 4. Результаты исследования нормирования шероховатости реальных поверхностей

Современные PLM-технологии (Product Lifecycle Management) развиваются в направлении глобального коллективного окружения — GCE (Global Collaborative Environment), которое состоит в разработке специализированной системы для внешнего проектирования и сопровождения изделий APRAR на всех этапах ЛТ. При реализации GCE-концепции, одновременно с внутренним проектированием основного изделия APRAR, производится технологическая подготовка производства (ТПП), в том числе и разработка систем управления процессом производства, в которые должна быть интегрирована автоматизированная система второго уровня интеграции — система контроля качества СОЭД-К с ПУАИК измерения ординат профиля шероховатости.

Для нормирования шероховатости реальных поверхностей установлено 3 высотных и 3 шаговых параметра, вычисляемых по значениям отклонений ординат  $y$  профиля шероховатости от прямой средней линии  $m$  в нормальном поперечном сечении в пределах стандартной базовой длины  $l$ .

Высотные статистические параметры  $Ra$  и  $Rz$  представляют собой среднюю *по модулю* высоту неровностей профиля:  $Ra$  (предпочтительный) — среднее по модулю арифметическое значение для всех  $y$  профиля для  $n$  точек профиля на длине  $l$ ;  $Rz$  — для ординат 5 наибольших выступов и 5 наибольших впадин на длине  $l$ ;  $Rmax$  — наибольшая высота профиля на расстоянии между линией выступов профиля и линией впадин профиля на длине  $l$ .

Шаговые статистические параметры:  $S_i$  — средний шаг неровностей профиля по вершинам; и  $S_{mi}$  — шаг профиля по средней линии  $m$  (нули профиля) и  $t_p$  — относительная опорная длина профиля (отношение опорной длины профиля к  $l$ ) и параметр  $t_p$ , аналогичный функции распределения выбросов  $\xi(t)$  над порогом [6], позволяют судить о фактической площади контакта поверхностей на заданном уровне  $p$  сечения профиля.

Выбор значений высотных и шаговых параметров и ненормируемого параметра DIR, указывающего направление неровностей и следов обработки, должен производиться с учетом эксплуатационных свойств поверхности (ЭСП). Основным во всех случаях является нормирование параметров шероховатости по высоте, причем предпочтительно нормировать  $Ra$ . В APRAR параметры  $t_p$  и параметр DIR имеют особое значение, так как с их помощью можно формализовать многие функциональные свойства изделий: износоустойчивость при трении; прочность и контактную жесткость конструкций и соединений из композитных материалов, особенно при циклических нагрузках; виброустойчивость при работе в газобразных, жидких средах и в плазме (аэродинамика, гидравлика, физические исследования); прочность и герметичность термостойких покрытий

и соединений при воздействии различных излучений, а также и поверхностное электрическое сопротивление при радиолокационном СВЧ-облучении.

На практике всегда есть некоторые данные, основанные на предыдущем опыте, физической трактовке задачи или даже интуиции. С точки зрения информационных технологий (ИТ) проектирования, определяемых как «ММ — алгоритм — программа», физическая трактовка относится к задаче моделирования (формирования ММ), а задача получения данных относится к задачам формирования баз знаний по шероховатости [2] поверхностей изделий APRAR. Формализация проблем информационного контакта при внешнем проектировании СОЭД-К осуществляется с помощью классификатора [10].

Использование в составе СОЭД-К интегрированных ПУАИК с первичными измерительными преобразователями (датчиками) на основе бесконтактных методов измерения шероховатости, вызывает трудности, вызванные, в основном, их узкой специализацией и необходимостью участия оператора. Предпочтение отдается интегрированным ПУАИК на базе аналоговых индукционных контактных датчиков (ИКД), устойчивых к ударным перегрузкам и воздействию внешних магнитных полей [2]. В таких СОЭД-К может быть применена внешне-внутренняя адаптация путем выбора минимального числа разрядов АЦП, что приводит к уменьшению статистической составляющей суммарной погрешности СОЭД-К.

В СОЭД-К с ПУАИК на базе ИКД имеется принципиальная возможность осуществлять процедуру вычислений  $Ra$  и  $Rz$  в режиме «онлайн» при автоматизации изготовления протяженных изделий APRAR не только для образцов стандартной базовой длины  $l$ , но и для простых нелинейных поверхностей с соотношением радиуса кривизны  $r$  и стандартной базовой длины  $l$  порядка  $100r \geq l$ , сечение которых в плоскости измерения представляет прямую линию  $L$ , что характерно для протяженных объектов. При реализации GCE-технологий проблема информационного контакта на этапе внешнего проектирования СОЭД-К с ПУАИК формально может быть сведена к решению конечного набора из трех статистических измерительных задач [10]:

**Задача 1.** Массив ординат отклонения  $y$  профиля шероховатости формируется в каждом отдельном эксперименте на различных интервалах одной и той же совокупности реализаций, рассматриваемых как стационарные неэргодические процессы при усреднении по множеству реализаций для вычисления средних оценок в виде математического ожидания  $Ra$  или  $Rz$ .

**Задача 2.** Массив  $y$  шероховатости формируется аналогично для вычисления оценок второго порядка типа дисперсии или СКО погрешности вычисления параметра  $Ra$  или  $Rz$ .

**Задача 3.** Массив ординат отклонения  $y$  профиля шероховатости формируется в каждом отдельном эксперименте на различных интервалах одной и той же совокупности реализаций, рассматриваемых как нестационарные неэргодические процессы при усреднении по множеству реализаций при вычислении текущих оценок характеристик выбросов траектории  $\xi(t)$  над заданным порогом  $p$  технологической шероховатости для обнаружении локальных дефектов (царапин, вмятин) деталей и изделий.

При выполнении этих трех задач производится ОМД и передача  $y$  по каналу связи на центральный процес-

сор ЭВМ для формирования массива  $\{y^*\}$ , данные из которого используются для вычислений статистических параметров шероховатости поверхности для 1-ой и 2-ой задач, а в 3-ей задаче производится вычисление  $t_p$  — фиксации превышения выбросов над заданным порогом  $p$  — уровнем заданной технологической шероховатости и волнистости на всех операциях изготовления деталей, сборки узлов и основного изделия APRAR.

В APRAR для работы СОЭД-К при реализации CALS-технологии достаточно вычисления оценок моментов первых четырех порядков: математического ожидания параметров  $Ra$  и  $Rz$  шероховатости; погрешности их вычисления; оценки асимметрии закона распределения  $\xi(t)$  по отношению к нормальному  $\xi(t)$  и оценки эксцесса закона распределения значений  $\xi(t)$ , близкого к нормальному.

Большинство аналого-цифровых СОЭД-К являются адаптивными системами, в которых необходимо изменить программу основной обработки и некоторую часть базы знаний, часто называемую условно-постоянной информацией (классификаторы и тезаурусы). Для адаптивных СОЭД-К при изменении условий функционирования основными инвариантами являются уже два критерия эффективности — суммарная погрешность как определяющий показатель  $Q$  качества СОЭД-К и программа оптимизации, реализующая метод повышения точности.

Одним из методов повышения точности аналого-цифровой СОЭД-К с интегрированным ПУАИК состоит в том, что в алгоритм вычисления  $Ra$  и  $Rz$  шероховатости в виде оценок центральных моментов  $\mu_k$  для  $\xi(t)$  с ограниченным диапазоном значений отклонений ординат профиля шероховатости, вводится табличный коэффициент *относительной* коррекции. Суть коррекции [1] состоит в том, что отсчет ординаты у точки профиля шероховатости производится не в середине дифференциального коридора  $\Delta x$ , а с *относительным сдвигом* с коэффициентом  $a$ , зависящим от  $W_i^*(x)$  — оценки вида закона распределения. При этом ширина  $\Delta x$  дифференциального коридора АЦП с  $n_{\Delta x}$  уровнями квантования и его динамический диапазон  $D = \Delta x n_{\Delta x}$  должны быть пронормированы по СКО.

Такая многоканальная СОЭД-К может обеспечить расширение [2] перечня измеряемых характеристик параметров шероховатости, в дополнение к  $Ra$  и  $Rz$ , за счет модернизации программного обеспечения центрального процессора ЭВМ СОЭД-К без изменения структурной схемы ПУАИК.

На протяженных объектах APRAR практически все измерения ординат шероховатости необходимо производить на нелинейных поверхностях, на которых движение точки контакта ИКД вдоль кривой  $a$  поверхности связано с непрерывным изменением расстояния  $S$ , на которое удалена точка контакта от своего начального положения и угла  $\alpha$  поворота касательной  $t$  в точке контакта относительно начального положения. Если с увеличением  $S$  увеличивается и угол  $\alpha$ , то кривая  $a$  называется *простой*. 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 плоскости  $XZ$  трассу базовой длины  $L$  можно рассматривать как плоскую кривую линию  $a$  или как траекторию движения точки, обкатывающей эту кривую без скольжения. В APRAR на участках произвольной

кривой  $S_x$  по оси  $X$  (по длине изделия) с соотношением радиуса кривизны  $r_k$  и базовой длины порядка  $L = 100r_k \geq l$  эвольвента  $a$  аппроксимируется ломаной, состоящей из  $i$  участков базовой длины  $l$ . В таких многоканальных СОЭД-К с интегрированными ПУАИК измерение  $y$  протяженных изделий APRAR может производиться одновременно по кривой  $S_x$  по оси  $X$  ( $Ly$  по длине изделия) и по кривой  $S_z$  по оси  $Z$  ( $Lz$  по ширине изделия) и формируются массивы  $\{y_y^*\}$  и  $\{y_z^*\}$  для вычисления  $Ra$  и  $Rz$ , в дискретных  $(1..i)$  точках, количество которых выбираются по общим правилам [11].

Величины базовых длин  $Ly$  и  $Lz$  могут изменяться, от стандартных, порядка 5–7 мм [4], до нескольких десятков миллиметров при перемещении ИКД по независимой линейной опоре (Traversing system of an instrument with the external reference datum). При этом ИКД с расширенным динамическим диапазоном не опирается на протяженную измеряемую криволинейную простую поверхность, сечение которой в плоскости измерения  $y$  представляет прямую линию, а перемещается по внешней линейной опорной базе, сохраняя постоянной ориентацию вектора перемещения. По результатам вычисления  $Ra1..Rai$  по каждой  $Ly$  и  $Lz$  и двумерного анализа шероховатости по изменению тренда средней линии методом аппроксимация могут быть сформированы ММ волнистости по осям  $S_x$  и  $S_z$  и вычислены, аналогично вычислениям числовых характеристик статических ММ шероховатости [5, 6], параметры динамических ММ шероховатости.

## 5. Обсуждение результатов формирования математических моделей шероховатости и волнистости

Процедура измерения  $y$  ординат нецентрированного  $\xi(l)$  и формирование массива  $\{y^*\}$  для простых поверхностей при использовании метода касательных плоскостей занимает значительное время, определяемое кривизной  $k$  или топологией изделий APRAR. Например, внешнее проектирование планера транспортного самолета [9] методом конечно-элементной модели может занимать время от 2 до 5 лет, а время анализа поверхностей готового изделия — от 1 до 6 месяцев, в связи с чем приобретает значение время измерения в ПУАИК и повышение быстродействия процессора СОЭД-К при обеспечении заданной точности.

Быстродействие СОЭД-К повышается за счет уменьшения числа разрядов АЦП ПУАИК и введения относительной коррекции в алгоритм вычислений.

## 6. Выводы

Метод повышения точности аналого-цифровой СОЭД-К с интегрированным ПУАИК, состоящий в том, что в алгоритм вычисления оценок  $Ra$  и  $Rz$  шероховатости для  $\xi(t)$  с ограниченным диапазоном значений отклонений вводится коэффициент относительной коррекции. Коррекция позволяет уменьшить число разрядов АЦП, повысить быстродействие СОЭД-К и вычислять статические характеристики шероховатости в режиме реального времени.

Показана возможность формирования динамической математической модели шероховатости — волнистости и вычисления ее параметров для простых поверхностей

по результатам вычисления статических характеристик шероховатости поверхностей при измерениях ординат профиля шероховатости индукционными контактными датчиками с расширенным динамическим диапазоном, перемещающихся по измерительной линейной базе. Обоснована возможность двумерного анализа шероховатости для аппроксимация тренда волнистости по результатам вычисления параметров шероховатости простых поверхностей протяженных изделий в авиастроении.

**Литература**

1. Мирошніченко, І. В. Формирование математической модели волнистости по результатам вычисления шероховатости протяженных изделий [Текст] / І. В. Мирошніченко // Технологический аудит и резервы производства. — 2014. — № 2/1(16). — С. 11–15. doi:10.15587/2312-8372.2014.23433
2. Детлинг, В. С. Інформаційно-вимірвальна система забезпечення якості шорсткості поверхні [Текст] / В. С. Детлинг, В. П. Зинченко, І. В. Мирошніченко // Вісник Черкаського Державного технологічного університету. — 2006. — Спецвипуск. — С. 135–137.
3. Гагарин, А. А. Шероховатость как геометрическая характеристика поверхностей изделий авиационной техники [Текст]: материалы конференции / А. А. Гагарин, І. В. Мирошніченко // XI Міжнародна науково-технічна конференція АВІА-2013, 21–23 травня 2013 р., Київ. — Том 1. — С. 1.3–1.16.
4. Марчук, М. О. Проблематика розробки інформаційних технологій контролю якості шорсткості поверхні [Текст] / М. О. Марчук, І. В. Мирошніченко // Технологічні комплекси. — 2012. — № 1, 2(5, 6). — С. 57–61.
5. Мирошніченко, І. В. Вероятностные характеристики статической математической модели шероховатости [Текст] / І. В. Мирошніченко // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. — 2013. — № 4(193), Ч. 2. — С. 109–113.
6. Мирошніченко, І. В. Математические модели геометрических характеристик поверхности протяженных объектов [Текст] / І. В. Мирошніченко // Адаптивні системи автоматичного управління. — 2013. — Вип. 1(22). — С. 45–55.
7. Detling, V. S. Information-logical model error of random statistical characteristics measurements [Text] / V. S. Detling, C. Kartunov, I. V. Miroshnichenko // International scientific conference, Gabrovo, 23–24 Nov. 2007. — P. 322–327.

8. Скоростная оптическая система измерения шероховатости SORM 3plus [Электронный ресурс]. — Режим доступа: \www/URL: http://www.emg-automation.com/nc/cn/automation/qs-systems/online-roughness-measurement-sorm-3plus/action/open-download/download/brochure-sorm-rus/
9. Зинченко, В. П. Алгоритм оптимального проектирования самолетов [Текст] / В. П. Зинченко, В. В. Борисов, І. В. Мирошніченко // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. — 2011. — № 13(167). — С. 70–74.
10. Мирошніченко, І. В. Об одном способе классификации статистических измерительных задач [Текст] / І. В. Мирошніченко // Математичне та комп'ютерне моделювання. — 2012. — Вип. 7. — С. 132–139.
11. Дорожовець, М. Основи метрології та вимірвальної техніки [Текст]. Том 1. Основи метрології / М. Дорожовець, В. Мотало, Б. Стадник. — Львів: Львівська політехніка, 2005. — 650 с.

**СТАТИЧНІ І ДИНАМІЧНІ МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ШОРСТКОСТІ ПРОТЯЖНИХ ПОВЕРХОНЬ**

Показана можливість формування динамічної математичної моделі шорсткості — хвилястості для простих поверхонь за результатами оцінок статичних математичних моделей шорсткості поверхонь, отриманих за результатами вимірювань ординат профілю шорсткості індукційними контактними датчиками з розширеним динамічним діапазоном, що переміщаються по незалежній лінійній базі.

**Ключові слова:** статистична математична модель, динамічна математична модель, шорсткість, хвилястість.

*Мирошніченко Іван Владимирович, старший преподаватель, кафедра автоматизации проектирования энергетических процессов и систем, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», Украина, e-mail: goodgod@ukr.net.*

*Мирошніченко Іван Володимирович, старший викладач, кафедра автоматизації проектування енергетичних процесів та систем, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Україна.*

*Miroshnichenko Ivan, National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Ukraine, e-mail: goodgod@ukr.net*

УДК 004.825

DOI: 10.15587/2312-8372.2015.37422

**Волосюк Ю. В.**

**МЕТОДИ ПАРАЛЕЛЬНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ АЛГОРИТМІВ КЛАСТЕРИЗАЦІЇ ТЕКСТОВИХ ДАНИХ**

*Розглянуто загальний алгоритм організації паралельних обчислень. Наведено особливості організації процесу паралельних обчислень, визначено критерії, що вказують на здатність алгоритму до представлення в паралельному вигляді. Розглянуто програмні засоби для розпаралелювання алгоритмів та розроблена версія алгоритму Maxітіп, побудована на основі паралельних обчислень. Отримані в роботі результати підтвердили доцільність використання паралельної реалізації зазначеного алгоритму.*

**Ключові слова:** паралельні обчислення, кластеризація, Maxітіп, алгоритмізація, продуктивність.

**1. Вступ**

Стрімке зростання обсягу інформації, представленому в електронному вигляді в сучасному інформаційному

просторі, спонукає до більш поглибленого вирішення задачі кластеризації документів. Завданням кластеризації є розподіл множини документів на заздалегідь невідому кількість підмножин.