

С. А. Лукьяненко, И. В. Мирошниченко,
А. А. Гагарин, А. В. Баранюк

АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТЕЙ ВЫЧИСЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ШЕРОХОВАТОСТИ В МНОГОКАНАЛЬНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ КОМПЬЮТЕРНЫХ СИСТЕМАХ

Аннотация: Математические модели (ММ), описывающие состояния APRAR, принято называть статическими, описывающие последовательность этих состояний – динамическими, а несоответствие реальных процессов в APRAR приписываемым ММ, особенно динамическим, характеризуется погрешностью классификации. Оценка погрешностей классификации динамических моделей, включающих в себя и статические, составляет основное содержание этапа внешнего проектирования, который заканчивается разработкой технического задания для внутреннего проектирования, на котором разрабатываются алгоритмы и программы функционирования СОЭД-К.

Ключевые слова: анализ обобщенной точности, системы обработки экспериментальных данных, контроль качества, шероховатость.

Введение

В качестве статической ММ шероховатости по стандартам [1], а также ISO и DIN, принимается случайный процесс $\xi(t)$, на практике представляемый реализациями в виде профилограмм [2]. Для описания ММ шероховатости в виде $\xi(t)$ с ограниченными значениями случайной величины (СВ) стандарты устанавливают шесть параметров: три высотных – Ra , Rz и R_{max} ; два шаговых – S_i , S_{mi} и t_p , которые вычисляются по значениям СВ – отклонений ординат y профиля шероховатости от средней линии m профиля шероховатости в нормальной плоскости в пределах стандартной базовой длины.

Высотные параметры ММ шероховатости вычисляются как статистические характеристики (СХ):

$$Ra = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y| \quad \text{и} \quad Rz = \frac{\sum_{i=1}^5 |y_{pmi}| + \sum_{i=1}^5 |y_{vmi}|}{5} \quad (1)$$

где Ra – среднее арифметическое значение абсолютных отклонений всех неровностей y профиля n выбранных точек на базовой длине l и Rz – сумма средних абсолютных значений высот пяти наибольших

выступов u_{pmi} и глубин u_{vmi} пяти наибольших впадин профиля в пределах базовой длины. Параметр S_i характеризует взаимное расположение (расстояние) характерных точек неровностей (максимумов R_{max}) профиля, S_{mi} – точек пересечения профиля со средней линией m (нулей профиля). Параметр относительной опорной длины профиля t_p , характеризующий высоту и форму неровностей профиля, позволяет судить о фактической площади контакта поверхностей на заданном уровне p , т.к. содержит наибольшую информацию о высотных свойствах профиля, аналогичен функции распределения выбросов $\xi(t)$ над порогом.

Постановка проблемы

При проектировании многоканальных и многофункциональных систем обработки экспериментальных данных для контроля качества (СОЭД-К) перспективным направлением является использование аналого-цифровых интегрированных измерительных каналов, результаты измерений которых в цифровом виде передаются для обработки центральным процессором СОЭД-К. При этом использование методов оптимизации структуры СОЭД-К затруднено из-за нечеткой постановки задачи [1] и поэтому почти всегда требуется разработка информационной технологии (ИТ), специфической для конкретной области, в частности, авиационной проблемной области (Aviation Problem area – APRAR), при вычислении параметров шероховатости поверхности [2].

Целью работы является анализ обобщенной точности СОЭД-К с интегрированными унифицированными каналами измерения ординат шероховатости (УКИШ), включающей аппаратные погрешности блоков УКИШ, статистические погрешности от конечности объема выборки результатов измерения ординат профиля шероховатости и погрешностей алгоритмов вычисления СХ шероховатости.

Анализ решений

Уменьшения сроков разработки и снижение стоимости СОЭД-К может быть осуществлено за счет применения так называемых CALS-технологий непрерывной информационной поддержки (Continues Acquisition and Life cycle Support – CALS), идея которых состоит в эффективном управлении при выборе оптимального решения по определяющему показателю качества (целевой функции эксперимента). В большинстве случаев для СОЭД-К в качестве определяющего показателя качества принимается суммарная статистическая относитель-

ная погрешность [1] вычисления СХ по результатам измерения ординат y профиля шероховатости. При учете лишь методических и аппаратурных и погрешностей точность системы называется *аппаратурной точностью*, а при учёте существенных их источников, рассматриваемых в теориях аппаратурной точности, надежности, теории алгоритмов и т.д., точность такой системы называется *обобщенной точностью* [8].

Использование обобщенной точности при проектировании СОЭД-К с адаптивными унифицированными УКИШ.

Основное содержание работы посвящено обоснованию необходимости использования обобщенной точности при проектировании СОЭД-К с адаптивными унифицированными УКИШ. При этом использование в УКИШ индукционных датчиков, наиболее устойчивых к ударным перегрузкам и воздействию внешних магнитных полей, являются предпочтительным при работе СОЭД-К в режиме «онлайн» при автоматизации изготовления протяженных изделий в APRAR [10].

В аналого-цифровых СОЭД-К для вычисления параметров Ra и Rz (1) используются результаты измерения ординат y профиля шероховатости, далее – центрированные сигналы $y_0(t)$, полученные от унифицированных каналов измерения шероховатости (УКИШ), содержащих аналоговые контактные индукционные датчики, аналоговые программно управляемые усилители, фильтры и АЦП [6]. В таких системах алгоритм вычисления

$$Ra = \langle g[y_0(t)] \rangle = K^P \cdot S_d^P g^P [y_0(t)] \quad (2)$$

предварительно нормированного и центрированного сигнала $y_0(t)$ начинается с операции сравнения в АЦП реальным оператором сравнения K^P – т.е. представления результатов измерения ординат y профиля шероховатости в цифровом виде, где S^P – оператор усреднения $\langle \rangle$ по конечной выборке d из $\{y^*\}$. При такой последовательности операций наибольшее влияние на обобщенную точность будет иметь погрешность от неидеальности выполнения оператора K^P или, иначе говоря, погрешность от квантования $y_0(t)$ [10]. Для центрированных $y_0(t)$ в общем случае уменьшается вероятность переполнения разряд-

ной сетки процессора СОЭД-К за счет уменьшения массива $\{y^*\}$ данных, что упрощает формирование числового эквивалента произведения $S_d^p g^p [y_0(t)]$, определяемого и числом разрядов АЦП.

Интегрированные УКИШ производят однородное масштабирование данных (ОМД) с последующей передачей ОМД-координат точек неровностей профиля в цифровом виде через канал связи на центральный процессор ЭВМ (host computer) для формирования массива $\{y^*\}$ отклонений y ординат профиля шероховатости, которые используются для вычислений стандартных параметров шероховатости и выработки сигналов управления усилителем УКИШ.

На практике при представлении статической ММ шероховатости в виде $\xi(t)$ [9] чаще всего встречаются законы $W(x)$ распределения значений отклонения ординат $y_0(t)$ профиля шероховатости: нормальный усеченный (закон Гаусса); Симпсона (закон равнобедренного треугольника) и равномерный (закон равной вероятности). Поэтому в СОЭД-К быть применена внешне-внутренняя адаптация [1] минимизацией числа разрядов АЦП, зависящего от вида $W(x)$, что приводит к повышению быстродействия АЦП, увеличению массива $\{y^*\}$, и уменьшению статистической составляющей погрешности СОЭД-К

При назначении в качестве определяющего показателя качества СОЭД-К суммарной относительной погрешности δ_Σ (точности – exactitude $ET = \frac{1}{\sigma_\Sigma}$) должны быть разрешены два компромисса [1]: между

ценностью информации и затратами на её получение, а также между начальными затратами и затратами на эксплуатацию СОЭД-К с заданной точностью ET при изменении параметров, например, метрологической надежности. Суммарная погрешность СОЭД-К с интегрированным УКИШ содержит две основные составляющие: аппаратурную погрешность блоков УКИШ и статистические погрешности от конечности отсчетов ОМД-координат точек неровностей массива $\{y^*\}$.

Аппаратурная погрешность блоков УКИШ, интегрированного в СОЭД-К [10] рассмотрена для его структурной схемы, приведенной [6].

Погрешность датчика имеет две основные составляющие – аддитивную, вызванную гистерезисом перемещения подвижной системы, и мультипликативную, вызванную нелинейностью характеристики датчика. Гистерезис H перемещения подвижной системы не пре-

вышает 0,3 мкм. Учитывая специфику аддитивной погрешности, СКО составляет половину значения гистерезиса: $\sigma(\Delta_d) = 0,5H = 0,15$ мкм. Мультипликативная погрешность от нелинейности датчика для малых перемещений (до 10 мкм) δ_{d1} составляет не более 0,5 %, а её СКО $\sigma(\delta_{d1}) = \frac{\delta_{d1}}{\sqrt{3}}$ составляет величину около 0,003; для больших перемещений (больше 10 мкм) δ_{d2} не более 2 % [6].

Погрешности усилителя с дифференциальным входным каскадом в основном определяется шумами и являются аддитивными. Погрешности от дрейфа «0» не влияют на усиление переменной составляющей напряжения сигнала. Мультипликативная погрешность усилителя, вызванная изменением сопротивления резисторов обратной связи от температуры, устраняется выбором однотипных прецизионных резисторов. Усилитель из пяти идентичных последовательно включенных каскадов, использующих высокоточные программируемые делители (ПД), мультипликативная температурная погрешность которых $\delta_{пд}$ около 0,1 %, позволяет получить СКО мультипликативной погрешности $\sigma(\delta_{пв}) = \frac{\sqrt{5}}{\sqrt{3}} \cdot \delta_{пд}$, что составляет величину около 0,001 В. Собственные шумовые напряжения операционных усилителей при плотности шумов, приведенных к входу, на частоте 5 кГц в полосе 20 Гц (± 10 Гц) составляют пренебрежимо малую величину порядка 15–20 нановольт.

Полосовой фильтр имеет аддитивную погрешность от шумовых составляющих такого же порядка, что и усилитель, но при приведении к входу усилителя будет уменьшена на порядок и ею можно пренебречь. Мультипликативная составляющая погрешности полосового фильтра, вызванная температурной нестабильностью резисторов с ТКС не превышает $5 \cdot 10^{-4} / ^\circ\text{C}$ и при $\Delta T = 20 ^\circ\text{C}$ $\delta_\phi = 0,5 \Delta T \cdot \text{ТКС}$ составляет величину около 0,0013, а её СКО $\sigma(\delta_\phi) = \frac{\delta_\phi}{\sqrt{3}}$ составляет величину (0,75-1) мВ.

Погрешность синхронного детектора определяется характеристиками качества аналогового перемножителя и, если систематическая составляющая смещения «0» скомпенсирована, то основной вклад в аддитивную погрешность детектора будет вносить темпера-

турный дрейф порядка $\Delta_T = 50 \text{ мкВ}/^\circ\text{С}$ и составляет величину около 1 мВ. Мультипликативная составляющая погрешности синхронного детектора определяется двумя погрешностями, приведенными к значению $U_H = 10 \text{ В}$: общей погрешностью перемножения δ_{XY} не более 0,5 %; и дополнительной температурной погрешностью δ_T около 0,01%.

Погрешность ФНЧ имеет аддитивный характер, так зависит от температурного дрейфа «0» операционных усилителей (k_T не более 0,3 мкВ/°С) $\Delta_\Phi = 0,5 \cdot k_T \cdot \Delta T$ и составляет величину менее (5-10) мкВ.

Погрешности АЦП. Аддитивная составляющая имеет две составляющие: методическую погрешность (или погрешность от квантования), равную 0,5 единиц младшего разряда (ЕМР). Например, для 7-разрядного АЦП ее СКО $\sigma(\Delta_{\text{КВ}}) = 0,5 \times \frac{\Delta_{\text{КВ}}}{\sqrt{3}}$ составляет величину около 0,05 В; инструментальную погрешность $\Delta_{\text{АЦП}} = 2 \text{ ЕМР}$, ее СКО для равномерного закона распределения аддитивной погрешности $\sigma(\Delta_{\text{АЦП}}) = \frac{2\Delta_{\text{КВ}}}{\sqrt{3}}$ составляет величину около 0,15 В. Мультипликативными составляющими погрешности современных АЦП (температурной погрешностью и погрешностью от нелинейности), составляющими доли процента, при вычислении Ra можно пренебречь.

Погрешность генератора $\sigma(\delta_{ГТ})$ имеет мультипликативный характер, обусловлена нестабильностью амплитуды от нестабильности источника питания и имеет порядок 0,1 мВ/°С в рабочем диапазоне ΔT температур при равномерном закон распределения.

Погрешности вычисляемых параметров шероховатости.

ММ суммарной мультипликативной погрешности УКИШ может быть $\xi(t)$ с нормальным (гауссовым) $W(x)$, так как мультипликативная погрешность каждого из i -го блоков обусловлена влиянием температуры.

Тогда:

$$\sigma[\delta_\Sigma] = \sqrt{\sum_{i=1}^n \psi_i^2 \sigma[\delta_i]^2 + \left(\sum_{i=1}^n \psi_i \cdot \sigma[\delta_{iT}]\right)^2}, \quad (3)$$

где Ψ_i — коэффициенты влияния погрешностей блоков; $\sigma[\delta_i]$ — СКО мультипликативных погрешностей (кроме температурных) блоков; $\sigma[\delta_{iT}]$ — СКО мультипликативных погрешностей от температуры блоков; $\sigma[\delta_\Sigma]$ — СКО суммарной мультипликативной погрешности.

Для УКИШ, спроектированного по разомкнутой структурной схеме, для всех блоков $\Psi_i = 1$, кроме генератора, у которого $\Psi_i = 2$. Тогда СКО суммарной мультипликативной погрешности УКИШ (3) для самого чувствительного (МАЛ) и самого грубого (БОЛ) пределов измерения составляет величину $\sigma[\delta_{\Sigma\text{МАЛ}}]$ около 0,001, а $\sigma[\delta_{\Sigma\text{БОЛ}}]$ — около 0,015.

Для вероятности $P=0,95$ значение суммарной мультипликативной погрешности УКИШ составит величину для $\delta_{\Sigma\text{МАЛ}}$ около 0,2 %, $\delta_{\Sigma\text{БОЛ}}$ — около 3 % .

Аналогично, в качестве модели суммарной аддитивной погрешности УКИШ может быть принят $\xi(t)$ с нормальным $W(x)$.

Тогда:

$$\sigma[\gamma_\Sigma] = \sqrt{\sum_{i=1}^n V_i^2 \cdot \sigma^2[\Delta_i] + (V_i \cdot \sigma_T[\Delta_i])^2}, \quad (4)$$

где $\sigma[\gamma_\Sigma]$ — СКО суммарной приведенной погрешности УКИШ; $\sigma[\Delta_i]$ — СКО погрешностей (кроме температурных) блоков; $\sigma_T[\Delta_i]$ — СКО аддитивных температурных погрешностей блоков.

СКО суммарной аддитивной приведенной погрешности (4) УКИШ будет иметь порядок $\sigma[\gamma_{\Sigma\text{МАЛ}}] = 0,07$ и $\sigma[\gamma_{\Sigma\text{БОЛ}}] = 0,0012$ [4]

Для вычисления значений Ra и Rz должно непрерывно вычисляться положение средней линии m по значениям отклонений ординат y профиля шероховатости, не имеющих систематической составляющей погрешности. 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 [9]. Тогда погрешность вычисления координаты средней линии будет не менее чем на порядок меньше погрешно-

сти прямых измерений ординат y профиля шероховатости. Поскольку при вычислениях (1) из каждого y_i элемента $\{y^*\}$ вычитается m , то погрешностью вычитаемого можно пренебречь, так как она примерно на порядок меньше, чем погрешность уменьшаемого.

Наличие в алгоритмах (1) вычислений Ra и Rz недифференцируемых функций (в нашем случае – модуля), приводит к осложнениям при расчете трансформированной погрешности алгоритма. Однако, если сделать некоторые допущения относительно характера обрабатываемых данных, то подобные трудности можно обойти. Массив $\{y^*\}$ состоит из большого числа элементов, математическое ожидание погрешности которых примерно равно нулю, так как профиль шероховатости можно считать реализацией стационарного и эргодического случайного процесса [7], а количество точек, лежащих выше и ниже средней линии, примерно одинаковое. Поэтому вычисление модуля, приводящее к инверсии знака погрешности для точек, лежащих ниже средней линии, не приводит к существенному изменению характеристик погрешности массива точек, лежащих ниже средней линии и при оценке трансформированной погрешности алгоритмов (1) вычисления Ra и Rz погрешности от вычисления модуля можно опустить.

С учётом этих допущений сумма аддитивной и мультипликативной составляющих суммарной погрешности при вычислении Ra составит величины порядка (0,3–0,5) % , а при вычислении Rz – около 2% .

При вычислении параметров Ra и Rz по результатам измерения профиля шероховатости необходим учет методической погрешности $\delta_{мет}$.

(Ra) контактного метода измерения ординат y , связанной с тем, что игла датчика при её перемещении не будет точно повторять профиль поверхности, а будет двигаться по наиболее выступающим вершинам профиля. Зависимость погрешности $\delta_{мет}(Ra)$ % вычисления Ra приведена в таблице, где $\lambda = r_n/S$ – отношения радиуса закругления r_n иглы к среднему шагу S неровности профиля

Зависимость погрешности $\delta_{мет} (Ra)$ % вычисления Ra

$\lambda = r_n/S$	$\delta_{мет}(Ra)$ %	$\lambda = r_n/S$	$\delta_{мет}(Ra)$ %
0,025	1	0,1	5
0,05	2	0,2	15

Поэтому для УКИШ должна производиться только калибровка, так он относится к тем средствам измерений, типы которых занесены в Государственный реестр средств измерительной техники, допущенных к применению в Украине и на которые не распространяется государственный метрологический надзор. Калибровка адаптивного УКИШ с типовым индукционным датчиком с радиусом алмазной иглы 5 мкм по тестовому «профилю шероховатости, близкого к трапецеидальному» [3] при вычислении Ra даёт предельные значения аддитивной и мультипликативной погрешности в начале (0,015 мкм) и в конце диапазона измерения (250,00 мкм) ординат шероховатости y_H , мкм порядка 5 % и 3 % соответственно, что не превышает предела допускаемой основной погрешности профилографов 1-й степени точности [3].

В СОЭД-К с интегрированными УКИШ имеется принципиальная возможность осуществлять процедуру вычислений параметров шероховатости не только на прямолинейной базовой длине [3], но и на простых нелинейных поверхностях, сечение которых в плоскости измерения представляет прямую линию, что характерно для протяженных изделий APRAR [9]. При этом статистические погрешности будут пренебрежимо малыми, так возможно непрерывное вычисление средней линии m профиля по большому числу ОМД-координат точек. По изменению m в процессе вычисления возможно формирование динамической ММ шероховатости для оценки волнистости поверхности изделий APRAR.

Выводы

Погрешности аналого-цифровых СОЭД с контактными индукционными датчиками, практически не подверженных воздействию электромагнитных полей и излучений оптического диапазона, их достаточно высокая надёжность и относительно невысокая стоимость, дают основания полагать о возможности их использования в цеховых условиях производства изделий APRAR, их испытаниях и модернизации.

Список использованных источников

1. Детлінг В. С. Вибір параметрів адаптивних систем обробки експериментальних даних / І. В. Мірошніченко, В. І. Павленко // Адаптивні системи автоматичного управління: міжвідомчий

- науково-технічний збірник. – Київ: Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут». – 2012.– Вип. 20(40). – С.41–51.
2. ГОСТ 2789-73. Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики
 3. ГОСТ 19300-86. Средства измерений шероховатости поверхности профильным методом. Профилографы-профилометры контактные
 4. Детлинг В. С. Система измерения шероховатости поверхностей / И. В. Мирошниченко // V Международная научно-техническая конференция «Гиротехнологии, навигация и управление движением» – Сборник докладов, Киев 21–22 апреля 2005 г. – С. 356–365.
 5. Марчук М. О. Проблематика розробки інформаційних технологій контролю якості шорсткості поверхні / І. В. Мірошниченко // Науковий журнал Технологічні комплекси № 1, 2 (5, 6) 2012, Луцький національний техніч. університет. С. 57–61.
 6. Мирошниченко И. В. Об одном способе классификации статистических измерительных задач / И. В. Мирошниченко // Математичне та комп'ютерне моделювання. Серія: Технічні науки: зб. наук. праць Інститут кібернетики ім. В.М. Глушкова Національної академії наук України, Кам'янець-Подільський Національний університет ім. Івана Огієнка, 2012.– Вип. 7. – С. 132–139.
 7. Мірошниченко І. В. Узагальнена точність як показник, що визначає якість систем обробки експериментальних даних при аналізі шорсткості в авіабудуванні / Г. В. Сарибога. // Галицька академія, Івано-Франківськ, Наукові Вісті 1(20) 2012, С. 41–47.
 8. Детлинг В. С. Математическая модель шероховатости протяженных объектов / 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.
 9. Мирошниченко И. В. Погрешности от неидеальности оператора сравнения статистических информационно-измерительных систем / И. В. Мирошниченко // VIII Международна науково-технічна конференція «Гиротехнології, навигация, керування рухом та конструювання авіаційно-космічної техніки» 21–22 квітня 2011 р. Київ, Україна. Збірник доповідей, Частина 4. С. 100–104.