

ИНФОРМАЦИОННАЯ МЕТОДИКА ИНТЕГРАЛЬНЫХ ОЦЕНОК ТОЧНОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ И ИЗМЕРЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ И УЗЛОВ ТРАНСПОРТНОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ

Рассмотрены теоретические основы информационного метода интегральных оценок при контроле точности изготовления деталей и узлов транспортных машин в условиях применения серийного технологического оборудования длительной эксплуатации. Особенностью метода является возможность совокупной оценки конструктивных параметров по измерению их систематической составляющей в изменяемом интервале неопределенности.



С.А. Синицын

Ключевые слова: предел измеримости точечных множеств, интегральная оценка точности измерений, мера и количество геометрической информации в линейных измерениях

EDN: BOLAFV

Процесс конструирования и изготовления деталей и узлов транспортных машин связан с высокоточными технологиями и измерениями, которые далеко не всегда могут быть обеспечены оборудованием в силу объективных условий, например, из-за старения и износа самого технологического оборудования. Кроме того, необходимо учитывать, что не все детали и узлы должны быть изготовлены с высокой точностью, неоправданно завышающей стоимость самого изделия. Такие обстоятельства в ряде случаев вызывают необходимость совокупных или интегральных оценок, учитывающих не только возможную или допустимую точность измерений на доверительных интервалах, но и числовые величины систематических составляющих самих конструктивных параметров.

Прежде, чем исследовать количественную сторону информационного содержания некоторой точки

поверхности детали, как универсального объекта измерения, необходимо выявить наиболее характерные свойства, определяющие содержательную часть информации, т.е. выявить ее семантическую структуру. Решение такой задачи имеет двоякий смысл. С одной стороны, выявляются основные компоненты информационного содержания точки как независимого формообразующего объекта поверхности детали, с другой стороны, выявляются математические характеристики или меры количества информации, приемлемые для решения данной задачи.

Одной из главных причин методических неудач в попытках применения информационного метода для решения широкого класса задач конструирования технических объектов, в том числе их поверхностей, стало прямое использование достижений классической, энтропийной теории информации, разрабо-

Синицын Сергей Александрович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Теоретическая и прикладная механика» Российской открытой академии транспорта Российского университета транспорта (РОАТ РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: прикладная геометрия, геометрическое и ситуационное моделирование в области искусственного интеллекта. Автор более 200 научных работ, в том числе семи монографий.

танной К. Шенноном в середине прошлого века для решения специфических задач в области связи при передаче информации.

Уместно вспомнить, что энтропийная теория была разработана для решения определенного класса задач теории связи, в которых неопределенность информации вычисляется на различных стадиях существования одного и того же конкретного сигнала. При этом полезный сигнал η существует в момент передачи по каналу связи, и его неопределенность характеризуется энтропией $H(\eta^*)$. Этот же сигнал существует после приема сообщения, но его неопределенность уменьшается до величины $H(\eta^0)$. Разность этих двух энтропий определяет количество информации, полученной в результате передачи сигнала. Такая задача имеет определенное смысловое содержание, не требующее выявления систематической составляющей [1].

Иная задача ставится в процессе технического конструирования, которое непосредственно связано с систематическими составляющими геометрических и прочих проектных параметров, вычисляемых в некоторых диапазонах достоверности. Такие диапазоны достоверности характеризуются энтропийными свойствами, но не содержат полезной информации в отсутствии систематической составляющей технического параметра.

Всякая геометрическая модель относится к классу технических объектов, которые конструируются по схеме иерархической, многоэтапной конкретизации изделия, элементы поверхности которого эта модель описывает [2]. Поэтому ее информационное содержание должно оцениваться на основе математической меры, учитывающей систематическую и случайную составляющие ее параметров.

Чтобы определить эти составляющие, присущие любому геометрическому параметру модели, рассмотрим элемент поверхности, представленный на рис. 1. Для его геометрической определенности зададим декартову систему координат $OXYZ$, а также масштабные единицы измерения по соответствующим осям: ΔX , ΔY , ΔZ . Далее определим координаты множества точек ξ_i , принадлежащих этой поверхности, либо множество образующих L_j , принадлежащих поверхности S , которые, в свою очередь, также определяются координатами точек ξ_i и рядом дополнительных дифференциально-геометрических условий.

Каждая координата точки в заданной системе отсчета является общей характеристикой любого геометрического элемента и определяет его детерминированные свойства. Такая координата задает целое число масштабных единиц измерений ΔX , ΔY , ΔZ , размещенных на координатном отрезке [3]. Измеренная длина координатного отрезка — случайная величина,

отличающаяся от своего истинного значения в пределах доверительного диапазона $\Delta \xi_i$, значение которого обычно принимается равным масштабу измерения по соответствующим осям. Доверительный диапазон координатных отрезков несет в себе случайную составляющую измерения.

Таким образом, общей характеристикой любой точки поверхности проектируемого объекта является свойство измеримости координатных отрезков, величины которых содержат две компоненты — систематическую (количество единиц измерения координат) и вероятностную (доверительный диапазон измерения): $\bar{X}_{\xi_i} = \bar{\xi}_{xi} \cdot \Delta X$.

В соответствии с семантической структурой параметров, измерение информационного содержания геометрических элементов должно выполняться на основе математической меры, учитывающей обе составляющие измеряемой величины — систематическую и случайную [4]. Параметры геометрической модели принимают случайные значения в соответствующих доверительных диапазонах $\Delta g_i^{(j)}$, где j — этап моделирования; i — номер параметра модели.

Каждый доверительный диапазон характеризуется величиной и законом распределения вероятностей значений, принимаемых при измерении координатных отрезков. В связи с чем, наиболее полной его характеристикой может быть энтропия, выраженная одним числом, учитывающим оба указанных свойства и обладающая аддитивностью относительно параметров геометрической модели. Практическое вычисление энтропии геометрических параметров требует знания вероятностных свойств их доверительных диапазонов, что не всегда оказывается возможным в реальных условиях моделирования [5]. Тогда приходится вводить дополнительную неопределенность путем рассмотрения равновероятных законов распределения, заданных размерными интервалами.

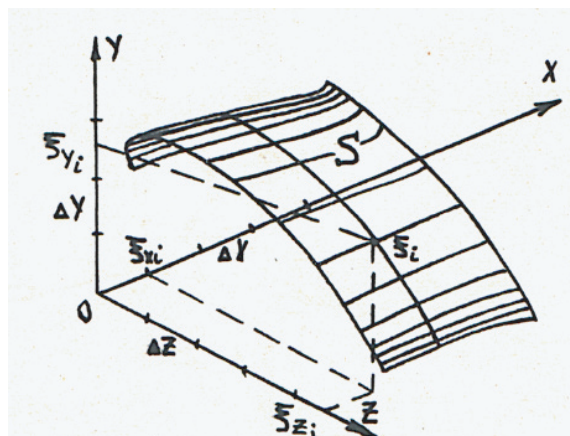


Рис. 1. Элемент поверхности каркасной структуры

Энтропия равномерного закона максимальна и ее расчет выполняется по простой формуле

$$H(g_i^{(j)}) = \ln \Delta g_i^{(j)}, \quad (1)$$

где $\Delta g_i^{(j)}$ — величина размерного доверительного диапазона i -го параметра модели на j -м этапе моделирования.

Вычисление энтропии по формуле (1) связано со значительными трудностями работы с размерными множествами $\Delta g_i^{(j)}$, в связи с чем возникает необходимость искусственного нормирования и обезразмеривания величин параметров геометрической модели. Все эти трудности вызывают серьезные проблемы в использовании энтропии в качестве самостоятельной математической меры для исследования информационных свойств геометрических моделей [6]. Чтобы упростить задачу, введем в рассмотрение меру количества информации, учитывающую энтропийные свойства объекта наряду с детерминированными.

Количество информации, приобретенное любым параметром в результате измерения, обычно определяется разностью

$$\text{Inf}(\Delta g_i^{(j)}) = H(\Delta g_i^{(j-1)}) - H(\Delta g_i^{(j)}), \quad (2)$$

где $H(\Delta g_i^{(j-1)})$ — энтропия i -го параметра геометрической модели на $(j-1)$ -м этапе ее применения;

$H(\Delta g_i^{(j)})$ — энтропия того же параметра на следующем этапе моделирования.

Если в правой части равенства (2) прибавить и вычесть одно и то же постоянное число C , то равенство сохранится:

$$\text{Inf}(\Delta g_i^{(j)}) = H(g_i^{(j-1)}) - H(g_i^{(j)}) + C - C. \quad (3)$$

В качестве постоянной C , с учетом свойства стационарности геометрических моделей в широком смысле, выберем геометрическую характеристику постоянную для j -го и $(j-1)$ -го этапов моделирования — логарифм математического ожидания параметра $g_i^{(j)}$:

$$\begin{aligned} \text{Inf}(g_i^{(j)}) &= \log(M[g_i^{(j)}]) - H(g_i^{(j)}) - \\ &- \log(M[g_i^{(j-1)}]) + H(g_i^{(j-1)}). \end{aligned} \quad (4)$$

Поскольку слева в равенстве (4) остается информация, то на основании базового соотношения измерения информации (2) можно утверждать, что каждое выражение в квадратных скобках (4) есть не что иное, как мера количества информации на различных этапах моделирования [7].

Введем обозначения:

$$\begin{cases} \text{ГИ}(g_i^{(j-1)}) = \log(M[g_i^{(j-1)}]) - H(g_i^{(j-1)}); \\ \text{ГИ}(g_i^{(j)}) = \log(M[g_i^{(j)}]) - H(g_i^{(j)}). \end{cases} \quad (5)$$

Преобразуем правые части равенства (5) с учетом формулы (1) и свойств логарифма:

$$\begin{cases} \text{ГИ}(g_i^{(j-1)}) = \log(M(g_i^{(j-1)}) / \Delta g_i^{(j-1)}); \\ \text{ГИ}(g_i^{(j)}) = \log(M(g_i^{(j)}) / \Delta g_i^{(j)}). \end{cases} \quad (6)$$

В дальнейшем будем называть выражения в левой части (6) геометрической информативностью, которая наиболее полно отражает семантические свойства геометрических параметров модели.

Геометрическая информативность представляет часть общего информационного тезауруса, определяющего характерные геометрические свойства плоских и пространственных объектов. Она может быть единой мерой для различных видов геометрических моделей только в том случае, если ее количественная оценка выполняется на основе семантических признаков общих для всех видов моделирования. Поэтому выявление таких общих свойств моделей является первоочередной задачей.

Для любого вида геометрических моделей наиболее общим свойством является измеримость составляющих ее геометрических элементов. Свойство измеримости непосредственно связано с масштабной единицей измерения, а сам процесс измерения состоит в установлении соответствия между измеряемым объектом и целым числом единиц масштаба. При этом минимальный измеренный параметр не должен быть меньше масштабной единицы измерения. В противном случае процесс измерения невозможен [8].

Помимо свойства измеримости геометрических объектов, существует их позиционная привязанность к заданной системе отсчета. Позиционная привязанность (или определенность) выражает вторую составляющую общих семантических признаков. Характерным геометрическим объектом является точка на плоскости или в пространстве, которая обладает единственным информационным признаком — позиционной определенностью.

На основании признаков метрической и позиционной определенностей будем различать две одноименные составляющие геометрической информации, сумма которых выражает полную геометрическую информацию в выбранной системе отсчета. Уместно вспомнить, что объект в евклидовом пространстве обладает тремя геометрическими свойствами: метрикой, формой и положением. Поскольку форма объекта описывается метрическими параметрами, то будем считать ее заданной, если метрические свойства определены заранее.

В соответствии с семантикой геометрической информации определим информационные свойства геометрических элементов на плоскости и в про-

пространстве [2]. Для этого зададим в пространстве R^3 декартову систему координат $OXYZ$ (рис. 2) с равными масштабами по всем осям ($\Delta X = \Delta Y = \Delta Z$). Определим некоторую точку $\eta(\eta_x, \eta_y, \eta_z)$ координатными отрезками:

$$X_\eta = \eta_x \Delta X; Y_\eta = \eta_y \Delta Y; Z_\eta = \eta_z \Delta Z. \quad (7)$$

Далее, относительно точки $\eta(\eta_x, \eta_y, \eta_z)$, как угловой, построим некоторый куб со стороной ΔX . Такой куб представляет собой предельный пространственный геометрический объект измеримого информационного содержания. Последовательно уменьшая масштабную единицу ΔX , будем строить относительно угловой точки η кубы со сторонами ΔX .

Переходя к пределу при $\Delta X \rightarrow 0$, получим информационную характеристику куба, все угловые точки которого стремятся к точке η :

$$\text{Inf}(\eta) = \lim_{\Delta X \rightarrow 0} [\text{Inf}(\eta_x, \eta_y, \eta_z, \Delta X)]. \quad (8)$$

Далее будем считать, что предел (8) определяет информационное содержание точки η в пространстве R^3 , в системе координат $OXYZ$ при равных масштабных единицах по всем осям.

Соединив точку $\eta(\eta_x, \eta_y, \eta_z)$ с началом координат отрезком $[0\eta]$, определим информационное содержание точки η аналогично плоскому случаю. Для этого вначале выразим информационное содержание отрезка $[0\eta]$, заданного координатами точки $\eta(\eta_x, \eta_y, \eta_z)$. Относительно отрезка $[0\eta]$ построим локальную систему координат $O^1X^1Y^1Z^1$ с теми же равными масштабами по осям ($\Delta X^1 = \Delta Y^1 = \Delta Z^1$).

Начало координат новой системы координат совместим с началом базовой системы ($O = O^1$), а ось O^1X^1 совместим с отрезком $[0\eta]$. Тогда информационное содержание отрезка $[0\eta]$ определится в локальной системе координат $O^1X^1Y^1Z^1$ через натуральный логарифм:

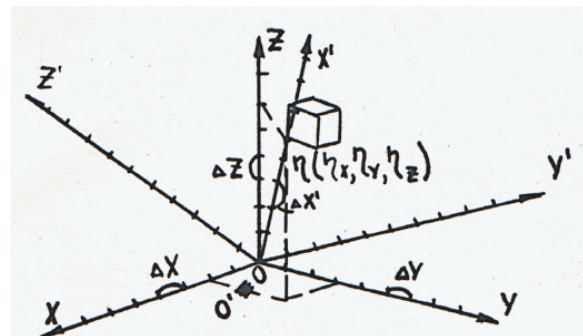


Рис. 2. Схема формирования предельной информации точки поверхности

$$\text{Inf}[0\eta] = \ln\left(\frac{\overline{0\eta}}{\Delta X^1}\right). \quad (9)$$

Выражая длину отрезка $[0\eta]$ через координаты точки η , получим:

$$\text{Inf}[0\eta] = \ln \frac{\Delta X \sqrt{\eta_x^2 + \eta_y^2 + \eta_z^2}}{\Delta X^1} = \ln \sqrt{\eta_x^2 + \eta_y^2 + \eta_z^2}. \quad (10)$$

Далее определим количество информации, приходящейся на единицу измерения ΔX^1 отрезка $[0\eta]$ в локальной системе координат $O^1X^1Y^1Z^1$. В результате получим формулу расчета информационного содержания точки η :

$$\text{Inf}(\eta) = \frac{\ln \sqrt{\eta_x^2 + \eta_y^2 + \eta_z^2}}{\sqrt{\eta_x^2 + \eta_y^2 + \eta_z^2}}. \quad (11)$$

Выражение (11) определяет информационное содержание точки $\eta(\eta_x, \eta_y, \eta_z)$ в исходной (базовой) системе координат $OXYZ$, независимо от величины масштаба измерения ΔX при условии равенства масштабных единиц по всем осям заданной системы ($\Delta X = \Delta Y = \Delta Z$). 

Литература

1. Синицын, С.А. Информационные характеристики доверительных диапазонов параметров ситуационных моделей. — Текст: непосредственный / С.А.Синицын, О.Ф. Гусарова // Оригинальные исследования. — 2019. — Т.9, №4. — С. 4—12.
2. Синицын, С.А. Техническое проектирование — преобразование доверительных диапазонов проектных параметров. — Текст: непосредственный / С.А.Синицын // Оригинальные исследования. — 2021. — Т.11, №9. — С.103—107.
3. Синицын, С.А. Погрешность формообразования поверхности, заданной кинематическим методом / С.А.Синицын. — Текст: электронный // E-Scio: научное сетевое издание. — 2020. — №2 (41). — С. 204—211. — URL: <https://e-scio.ru/wp-content/uploads/2020/02/Синицын-С.-А.pdf> (дата обращения: 18.08.2022).

4. Сеницын, С.А. Погрешность формирования поверхности точечного каркаса / С.А.Сеницын. —Текст: непосредственный // Оригинальные исследования. —2020. —Т.10, №2. —С. 51–56.
5. Левчук, Т.В. Трехмерное моделирование при визуализации математических и технических задач / Т.В. Левчук, А.Р. Ким. —Текст: непосредственный // История и перспективы развития транспорта на севере России. —2016. —№1. —С. 75–78.
6. Левчук, Т.В. Оптимизация систем массового обслуживания / Т.В. Левчук, М.С. Казаков, А.С. Зверев. —Текст: непосредственный // История и перспективы развития транспорта на севере России. —2014. —№1. —С. 84–87.
7. Sergey Sinitsyn, Vladimir Panchenko, Valeriy Kharchenko, Pandian Vasant. Optimization of Parquetting of the Concentrator of Photovoltaic Thermal Module // Intelligent Computing & Optimization. Advances in Intelligent Systems and Computing, Volume 1072, 2020, pp. 160–169, https://doi.org/10.1007/978-3-030-33585-4_16.
8. Sergey Sinitsyn, Vladimir Panchenko, Valeriy Kharchenko, Andrey Kovalev, Pandian Vasant The Concept of Information Modeling in Interactive Intelligence Systems // Intelligent Computing & Optimization. Advances in Intelligent Systems and Computing, Volume 1072, 2020, pp. 249–259, https://doi.org/10.1007/978-3-030-33585-4_25.