

*Синицын Сергей Александрович, доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой «Теоретическая и прикладная механика»  
Российского университета транспорта (РУТ(МИИТ))*

## **ИНФОРМАЦИОННАЯ МЕТОДИКА УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ ПОВЕРХНОСТИ СОЛНЕЧНОГО КОНЦЕНТРАТОРА, ЗАДАННОЙ ДИСКРЕТНЫМ МНОЖЕСТВОМ ТОЧЕК**

**Аннотация:** На примере моделирования поверхности солнечного концентратора свободного типа представлена реализация методики управления формой поверхности, которая дает возможность уменьшать погрешность и тем самым обеспечивать заданное распределение концентрированного солнечного излучения в фокальной области. В результате чего выходные характеристики фотоэлектрических и тепловых преобразователей солнечной энергии могут быть близкими к проектным, а сама установка работать в оптимальном режиме. Начальная информация для расчета поверхности обычно задается точечным массивом. С точки зрения моделирования аналитическое описание кривой может быть выполнено с абсолютной точностью, в тоже время при ее воспроизведении в метрическом дискретном пространстве возникает погрешность, связанная с масштабными единицами ( $e_x, e_y, e_z$ ), которую можно представить трубчатой поверхностью, огибающей дискретные сферы рассеяния точечных множеств. При изучении вопроса о погрешностях задания точечного базиса и кривых предлагается рассматривать две составляющие, связанные с погрешностью представления (моделирования) аналитических кривых и с погрешностью задания линейных обводов, построенных методами аппроксимации.

**Ключевые слова:** геометрическое моделирование, погрешности формообразования, солнечный концентратор, точечный базис, сфера рассеяния

точек, компоненты погрешности, геометрическая информация, линейные обводы.

**Annotation:** On the example of modeling the surface of a free-type solar concentrator, an implementation of the method for controlling the accuracy of the form is presented, which makes it possible to control the manufacturing error and thereby ensure the required distribution of concentrated solar radiation in the focal region. As a result, the output characteristics of photovoltaic and heat converters of solar energy can be close to the design, and the installation itself can operate in nominal mode. The initial information necessary for specifying the surface can be specified by a point basis. From a topological point of view, the analytical description of the curve is performed with absolute accuracy, but when it is reproduced in metric discrete space, an error arises determined by the scale units ( $e_x$ ,  $e_y$ ,  $e_z$ ), which can be represented by a tubular surface enveloping the scattering sphere. When studying the question of the errors in the definition of a point basis and curves, two sides of the problem are considered, associated with the error in reproducing (modeling) analytical curves using technical means and with the error in forming linear contours constructed by approximate methods.

**Keywords:** geometric modeling, shaping errors, solar concentrator, point basis, points scattering spheres, error components, geometric information, linear contours.

Моделирование поверхности солнечного концентратора дискретным множеством точек определяет некоторую возможную интерполяцию при различных дифференциальных требованиях [1, с. 36]. Наиболее простой и доступный метод, связан с линейной интерполяцией отрезками. Достаточная геометрическая информация для задания определяется его граничными точками ( $x_A, y_A, z_A, x_B, y_B, z_B$ ), (рис.1).

Определение шести параметров в пространстве  $R^3$  или четырех параметров на плоскости задает полный набор компонентов геометрической информации: форму, метрику, положение ( $\{S\}$ ,  $\{m\}$ ,  $\{P\}$ ). Каждая из

компонентов информации отрезка несет неопределенность, связанную с точностью задания координат граничных точек, показателем которой могут быть единицы масштаба. Будем считать, что форма отрезка не отклоняется от прямой, содержащей данный отрезок. Метрическая компонента информации вносит неопределенность, зависящую от масштабных единиц дискретизации. Неопределенность положения отрезка в пространстве связана с положением его граничных точек в принятой системе отсчета [2, с. 73].

Если отрезок  $[AB]$  задан в декартовой системе координат  $OXYZ$  граничными точками:  $A(x_A, y_A, z_A)$ ,  $B(x_B, y_B, z_B)$  (рис.1), то погрешность его задания определяется единицами метрики по осям  $e_x, e_y, e_z$ .

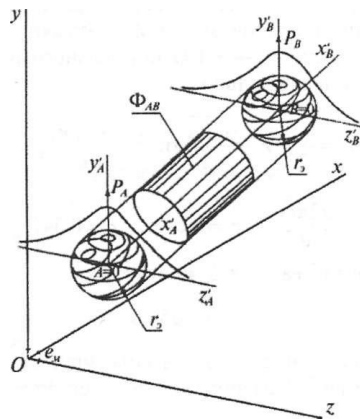


Рис. 1. Распределения погрешностей задания граничных точек.

В точках  $A$  и  $B$  заданы локальные системы отсчета  $A(0_A'X_A'Y_A'Z_A')$  и  $B(0_B'X_B'Y_B'Z_B')$  с осями, направления которых совпадают с осями базовой системой координат  $OXYZ$ . Относительно точек  $A$  и  $B$  [3, с. 82], приняты нормальные распределения по осям.

С учетом равенства минимальных параметров дискретизации ( $e_x=e_y=e_z=e_m$ ) по всем осям получаем одинаковые законы распределений, которые образуют не связанные системы разброса граничных точек, действие которых равновероятно по направлениям, выбранным относительно точек  $A$  или  $B$ . Значение радиуса рассеяния  $r$  выбирается в соответствии с методом оценок погрешностей. Для метода СКО  $r_\sigma = 3\sigma$ , для энтропийного метода -  $r_\sigma = \Delta_\sigma$ .

Параметр измеримости  $e_m$  обычно принимается равным  $e_m=6\sigma$ , где  $\sigma$  - СКО нормального распределения [4, с. 85]. Следовательно, с учетом  $2r_3=\Delta_3; \Delta_3=0,685e_m$ .

Таким образом, для нормального закона распределения, энтропийная погрешность меньше погрешности СКО.

С учетом принятого допущения о прямолинейности отрезка, его ориентация равновероятна в области [5, с. 192], замкнутой цилиндрической поверхности  $\Phi_{AB}$  (рис.1), огибающей пару сфер рассеяния, построенных в точках А и В.

Точность задания каждой точки  $\xi_i \in [AB]$  определяется величиной энтропийной погрешности:

$$\Delta_3 = \frac{\sqrt{2\pi e}}{6} e_\mu = 0,685e_\mu. \quad (1)$$

Погрешность задания отрезка в системе координат OXYZ выражается отношением:

$$\frac{1}{P_{AB}} = \frac{\overline{AB}}{\Delta_3} = \frac{\overline{AB}}{\sqrt{2\pi e}} * \frac{6}{e_\mu}, \quad (2)$$

где  $P_{AB}$  – относительная погрешность задания отрезка.

Определив длину отрезка через координаты граничных точек:

$$\overline{AB} = e_\mu \sqrt{(x_A - x_B)^2 + (y_A - y_B)^2 + (z_A - z_B)^2}, \quad (3)$$

можно получить относительную погрешность задания отрезка:

$$P_{AB} = \frac{\sqrt{2\pi e}}{6\sqrt{(x_A - x_B)^2 + (y_A - y_B)^2 + (z_A - z_B)^2}}. \quad (4)$$

В тоже время, количество информации об отрезке, заданном в дискретной системе координат OXYZ( $e_m$ ) при  $e_m=1$ , равно:

$$\ln f(P_{AB}) = \ln \frac{6}{\sqrt{2\pi e}} + 0,5 \ln \overline{AB}. \quad (5)$$

Первое слагаемое  $\ln \frac{6}{\sqrt{2\pi e}}$  определяет прирост информации за счет повышения точности при переходе от оценок  $\sigma$  (СКО) к энтропийным оценкам.

В декартовой системе координат  $OXYZ(e_m)$  пространства  $R^3$  зададим множество точек поверхности концентратора [6, с. 235]  $\{A_i\}$  тройками чисел  $(x_i, y_i, z_i)$ , каждое из которых измеряется с некоторой точностью  $e_m$ . Соединив точки  $\{A_i\}$  множеством отрезков, построим ломаную  $A_0A_N$ .

В каждой узловой точке  $A_i$  ломаной  $A_0A_N$  построим локальную систему координат  $O_i'X_i'Y_i'Z_i'$  с направлениями осей, совпадающими с базовой СКО и такой же метрикой ( $e_\mu = e_m$ ). Тогда, в любой произвольной точке  $A_i$  может быть построена сфера рассеяния точечных множеств с радиусом  $r_3$ :

$$r_3 = \frac{\sqrt{2\pi e}}{12} e_\mu = \frac{\sqrt{2\pi e}}{2} \sigma. \quad (6)$$

Далее можно построить множество одинаковых сфер радиуса  $r_3$  в каждой узловой точке ломаной  $A_i (i=1, 2, \dots, N)$ . Для каждой пары соседних сфер  $A_i, A_{i+1}$  строится огибающая цилиндрическая поверхность [7, с. 106]. В результате выполненных построений можно получить кусочную цилиндрическую поверхность, внутри которой равновероятно положение отрезков ломаной.

Абсолютные погрешности построения отрезков ломаной  $A_0A_N$  приняты равными  $r_3$ . Суммарная абсолютная погрешность ломаной [8, с. 304] зависит от параметра сферы рассеяния  $r_3$ :

$$\Delta_3^* = 2r_3 = 2r_{31} = \dots = 2r_{3N}, \quad (7)$$

при этом СКО системы независимых погрешностей определяется СКО нормального закона распределения по любой координате:

$$\sigma_\Sigma = \sigma_H = \frac{e_\mu}{6}. \quad (8)$$

В случае, если узловые точки ломаной заданы с разными погрешностями, то  $\sigma_\Sigma$  определяется по формуле:

$$\sigma_\Sigma = \sqrt{\sum_{i=0}^N \sigma_i^2}, \quad (9)$$

где  $\sigma_i$  – СКО независимых параметров  $A_i$  с нормальным распределением. Суммарное распределение также будет нормальным.

Далее, с учетом  $\sigma_\Sigma$  (8), (9) вычисляется энтропийная погрешность задания ломаной:

$$\Delta_3 = \sqrt{2\pi e} \sigma_\Sigma. \quad (10)$$

Поскольку длина ломаной оценивается суммой длин ее отрезков [9, с. 70], то относительная погрешность определяется с учетом (10) по формуле:

$$P_{A_0 A_N} = \frac{\Delta_3^*}{\sum_{i=1}^N L_i} = \frac{\sqrt{2\pi e}}{\sum_{i=1}^N L_i} \frac{e_\mu}{6}. \quad (11)$$

Точность моделирования оценивается, как величина обратная относительной погрешности. Количество информации о ломаной, заданной в системе координат с фиксированной метрикой  $e_M=1$  вычисляется по формуле:

$$\ln f(P_{A_0 A_N}) = \ln \frac{6}{\sqrt{2\pi e}} + \ln \left( \sum_{i=1}^N L_i \right), \quad (12)$$

где  $L_i$  – длины отрезков, измеренных в единицах масштаба  $e_M$ .

Первое слагаемое  $\ln \frac{6}{\sqrt{2\pi e}}$  в выражении (12) постоянно и оценивает прирост информации для энтропийного метода вычисления погрешностей.

### **Библиографический список:**

1. Синицын С.А. Информационно-статистический метод оптимального моделирования гладких дифференциальных поверхностей при итерационном проектировании технических объектов на транспорте// монография. Москва: ФГАОУ ВО «Московский университет путей сообщения». РОАТ. 2017. 103с.
2. Панченко В.А. Моделирование солнечных теплофотоэлектрических модулей // Электротехнологии и электрооборудование в АПК, 2019, 2 (35), с. 71 – 77.
3. Левчук Т.В., Лочканов Д.С., Морозов К.О. Компьютерное и математическое моделирование экономических и транспортных процессов// История и перспективы развития транспорта на севере России. 2014. №1. С.82-84.
4. Левчук Т.В., Казаков М.С., Зверев А.С. Оптимизация систем массового обслуживания// История и перспективы развития транспорта на севере России. 2014. №1. С.84-87.

5. Левчук Т.В., Захаров К.О., Вороненков А.А. Системы управления измерениями// История и перспективы развития транспорта на севере России. 2014. №1. С.190-194.

6. Панченко В.А.. Создание трёхмерных моделей солнечных теплофотозлектрических модулей в системе автоматизированного проектирования // Инновации в сельском хозяйстве. Теоретический и научно-практический журнал, № (2) 27/2018, с. 232 – 238.

7. Панченко В.А. Моделирование теплофотозлектрических модулей для энергоснабжения инфраструктурных объектов // Современные проблемы совершенствования работы железнодорожного транспорта: межвузовский сборник научных трудов – Москва: Российский университет транспорта (МИИТ), 2018, с. 100 – 109.

8. Киричев А.В., Климов Е.И., Панченко В.А. Обзор теплофотозлектрических модулей как энергоэффективных установок солнечной энергетики // Эффективная энергетика – 2015. Материалы научно-практической конференции с международным участием 21 – 22 мая 2015 года Издательство политехнического университета, Санкт – Петербург, 2015 г, с. 301 – 307.

9. Левчук Т.В., Втулкин М.Ю. Инновационные технологии на железнодорожном транспорте// История и перспективы развития транспорта на севере России. 2012. №1. С.68-71.