УДК 004.942:621.753

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ ЦЕНТРОИСКАТЕЛЕЙ ОТВЕРСТИЙ ДЕТАЛЕЙ МЕТОДОМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Порохин В.В., Каракулев Ю.А., Миннигазимов Р.И., Гнездилова М.С.

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики», Санкт-Петербург, e-mail: kulogorw49@yandex.ru

Настоящая статья посвящена разработке математической модели оценки точности центроискателей отверстий деталей на основе размерных цепей и вычислительной математики. Показано, что квалитеты, рассчитанные при прямой задаче с заданными допусками, могут быть расширены. Предложена методика для точностной оценки конструкции центроискателей, позволяющая анализировать различные типы центроискателей, выявлять звенья, наиболее впияющие на точность, и оптимизировать конструкцию. Она была применена для оценки точности типовой конструкции центроискателей с заданными допусками на отклонение от соосности в 0,05 мм (турбина К-300-240) и 0,1 мм (тепловозный дизельный двигатель 10Д100). В результате расчета размерной цепи при прямой задаче были получены значения: 5 квалитет для первоголучая и 6 для второго. Для проверки при обратной задаче были получены значения программа, рассчитывающая замыкающее звено по методу Монте-Карло с распределением по Гауссу. Средние значения отклонений по одной опоре составили 0,034 мм и 0,051 мм соответственно. Итоговое значение отклонения точности конструкции будет определяться взаимным влиянием всех опор друг на друга.

Ключевые слова: центроискатель, размерная цепь, метод Монте-Карло, математическое моделирование

RESEARCH OF THE DETAILS HOLES CENTER-FINDERS ACCURACY BY METHOD OF MATHEMATICAL MODELING

Porokhin V.V., Karakulev Yu.A., Minnigazimov R.I., Gnezdilova M.S.

FSAEI «Saint-Petersburg State Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics», Saint-Petersburg, e-mail: kulogorw49@yandex.ru

This article is devoted to the development of mathematical model components holes center-finders, which based on the dimension chains and computational mathematics. It's shown that the tolerance grade calculated in case of the direct task with the given tolerances can be expanded. Methodology for precision estimate of center-finders construction, allows to analyze different types of center-finders, to reveal the links, which are influences accuracy the most and to optimize construction. It was applied for estimate of the accuracy of center-finders standard construction with the given tolerances for a deviation from coaxiality that equal to 0.05 mm (turbine K-300-240) and 0,1 mm (the diesel engine 10D100). In case of the calculating a dimensional chain with the direct task, values were received: 5 accuracy class for the first case, and 6 for the second. For checking results, in case of the reverse task, the computer program calculating closing link according to the Monte-Carlo's method with the distribution according to Gauss was created. Mean values of deviations on one support made 0,034 mm and 0,051 mm respectively. Aggregate value of a deviation of construction could be define by cross coupling of all supports at each other.

Keywords: center-finder, dimensional chain, Monte Carlo method, mathematical modeling

Одним из основных свойств, обеспечивающих качество объектов машиностроения, является геометрическая точность корпусных деталей, таких как блоки цилиндров, корпуса редукторов, опоры валов и другие. Это базовые, системообразующие детали, которые обеспечивают рабочее положение других деталей, а значит, надежность и долговечность работы всего объекта.

Функциональными параметрами указанных деталей являются соосность, перпендикулярность, параллельность и пересечение осей отверстий. Для контроля этих параметров у крупногабаритных деталей (более 8 м) обычно используют визирный метод, который реализуется с помощью координатного оптического измерителя и указателя положения центра отверстия детали — центроискателя. Если применяемые измерители, как правило, являются

универсальными устройствами (визирные измерительные трубы, цифровые автоколлиматоры), то центроискатели являются оригинальными устройствами. К настоящему времени существует в натуре и инженерных разработках множество моделей. Но, несмотря на все их разнообразие, задача создания универсального центроискателя не решена. Требуются конструктивные решения, обладающие новыми функциональными свойствами, принципом действия, используемыми материалами, различными габаритами, которые будут обеспечивать заданную точность фиксирования центра отверстия, а значит, и точность контроля базовых деталей [4].

Поэтому, проектируя новые модели или анализируя известные конструкции центро-искателей, необходимо оценивать погрешность определения центра отверстия.

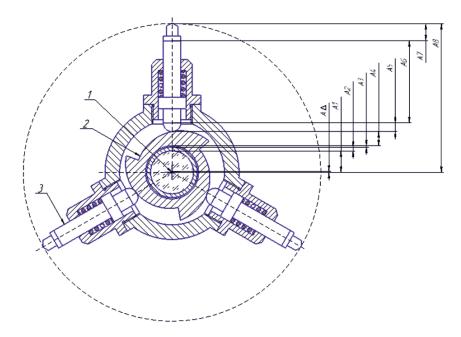


Рис. 1. Схема типового центроискателя и размерная цепь его опоры

В настоящей работе показана возможность математического моделирования с использованием методов размерных цепей, Монте-Карло и вычислительной математики для оценки точности центроискателей. На основе указанных методов составлен алгоритм и проведено численное моделирование типового центроискателя при прямой (определении квалитета составляющих звеньев) и обратной (определении номинального размера и квалитета замыкающего звена) задачах.

Материалы и методы исследования

Объект исследования. Для разработки математической модели и проведения расчетов выбрана типовая схема центроискателя, показанная на рис. 1. Она состоит из целевого знака 1 (сетка с перекрестием или координатный фотоприемник), поворотного диска 2, разделенного на три сектора с переменным профилем, и трех опор 3. При развороте диска опоры смещаются до соприкосновения со стенкой отверстия. В результате целевой знак фиксируется в центре отверстия [10].

Методика исследования. Действительное положение целевого знака в отверстии обеспечивается точностью деталей центроискателя и их сопряжением. Поэтому при оценке точности необходимо учитывать взаимосвязанные размеры, их квалитеты, отклонения, взаимовлияние друг на друга. Перечисленные задачи решаются с использованием теории размерных цепей (PII).

РЦ центроискателя составлена для одной опоры (рис. 1). Для остальных опор, из-за симметричности конструкции, РЦ аналогичны. Она представляет собой набор звеньев, где \mathbf{A}_i – квалитеты сопрягаемых деталей, \mathbf{A}_{Δ} – отклонение целевого знака от центра отверстия.

Составленная РЦ опоры центроискателя позволяет решить две задачи. Рассчитать допуски и установить квалитеты составляющих звеньев исходя из заданных точностных требований к замыкающему звену. Установить номинальное значение и квалитет замыкающего звена по установленным квалитетам составляющих звеньев [8].

Исходя из того, что номинальные размеры, входящие в РЦ, имеют значения разных порядков, расчеты выполнены способом одного квалитета.

Необходимый квалитет a_{cn} определяется по формуле

$$a_{cp} = \frac{T_{\Delta}}{\sum_{i=1}^{k-1} i_i},\tag{1}$$

где T_{Δ} — заданный допуск замыкающего звена, i — единица допуска, которая рассчитывается по формуле:

$$i = 0.45\sqrt[3]{D} + 0.001D,$$
 (2)

где D – средний геометрический размер для интервала диаметров, к которому относится данный линейный размер [7].

При поверочном расчете (обратной задаче) параметры замыкающего звена определяются по следующим формулам.

Номинальный размер замыкающего звена:

$$A_{\Delta} = \sum_{i=1}^{n} A_{i} = \sum_{j=1}^{n_{j}} A_{j} - \sum_{q=1}^{n_{q}} A_{q}.$$
 (3)

Верхнее отклонение замыкающего звена:

$$\Delta_{B_{\Delta}} = \Delta_{0_{\Delta}} + \frac{\delta_{\Delta}}{2}. \tag{4}$$

Нижнее отклонение замыкающего звена:

$$\Delta_{B_{\Delta}} = \Delta_{0_{\Delta}} - \frac{\delta_{\Delta}}{2},\tag{5}$$

где $A_{_{\Lambda}}$ — номинальный размер замыкающего звена, $A_{_{i}}$ — номинальный размер любого составляющего звена, $A_{_{i}}$ — номинальный размер увеличивающего звена,

 ${\rm A}_q$ — номинальный размер уменьшающего звена, n_j и n_q — число увеличивающих и число уменьшающих звеньев, ${\rm \Delta}_{{\rm B}\Delta}$ и ${\rm \Delta}_{{\rm H}\Delta}$ — верхнее и нижнее отклонения замыкающего звена, ${\rm \Delta}_{{\rm 0}\Delta}$ — координата середины поля допуска замыкающего звена, ${\delta}_{\Delta}$ — допуск на замыкающее звено.

В реальной конструкции размеры составляющих звеньев являются случайными величинами. Следовательно, замыкающее звено РЦ также является случайной величиной. Поэтому возможно использовать в расчетах РЦ метод статистического моделирования (Монте-Карло), который наиболее приближен к реальной модели. Он основан на моделировании случайных значений номинальных размеров звеньев, распределенных в поле их допуска по заданному закону и с заданными вероятностными характеристиками. Перейдя от случайного сочетания погрешностей к случайному сочетанию размеров составляющих звеньев, находят *i*-ую реализацию результирующей погрешности [6].

При моделировании значений составляющих звеньев РЦ использовался наиболее универсальный закон рассеяния случайных величин — нормальный (Гаусса). Вместе с тем предлагаемая математическая модель позволяет использовать и другие функции распределения [2].

На основании изложенного разработан алгоритм и компьютерная программа расчета РЦ. На рис. 2 по-

казана схема программы для расчета замыкающего звена РЦ с применением метода Монте-Карло [3].

Алгоритм построен следующим образом. Вначале производится ввод данных: $A[\dots]$ – массив номинальных значений звеньев; $ES[\dots]$ – верхнее отклонение звеньев; $EI[\dots]$ – нижнее отклонение; $Z[\dots]$ – массив для коэффициентов, определяющих тип звеньев; $S[\dots]$ – массив значений, распределенных по закону Гаусса с математическим ожиданием, равным 0, и СКО, равным 1; $ZV[\dots]$ – массив значений замыкающего звена; $ZV[\dots]$ – массив значений замыкающего звена; $ZV[\dots]$ – массив значение замыкающего звена.

Массив Ai[...][...] заполняется по формуле определения случайных значений звена в размерной цепи для нормального усеченного распределения. Переменные Tv и Tn – квантили распределения для односторонних доверительных вероятностей Yv и Yn, соответствующих верхней и нижней границам рассеяния размеров (для расчета Yv и Yn выбраны равными 0,99865, соответственно Tv и Tn = 3) [5].

Значение переменной, определяющей количество значений для каждого звена РЦ **n**, определяется необходимой точностью вычислений и может варьироваться в зависимости от вычислительной мощности компьютера.

На выходе получаем значение замыкающего звена — отклонение целевого знака центроискателя относительно центра контролируемого отверстия вдоль оси опоры.

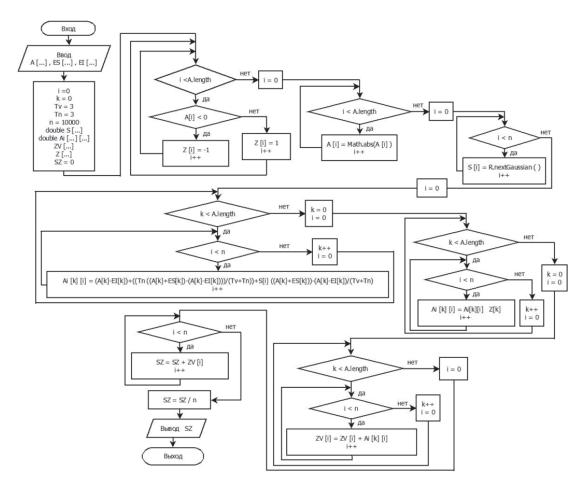


Рис. 2. Схема программы расчета замыкающего звена РЦ методом Монте-Карло

Реальное (рабочее) положение центроискателя предполагает его контакт со стенкой отверстия при помощи трех равномерно расположенных опор (рис. 3). При этом каждая опора будет влиять на положение целевого знака относительно центра отверстия в зависимости от величины отклонения. Для определения результирующего отклонения \vec{V} необходимо выполнить алгебраическое суммирование отклонений по осям опор центроискателя — векторы $\vec{V1}$, $\vec{V2}$, $\vec{V3}$.

Координаты вершины вектора $ec{V}$ будут определяться по следующим формулам:

$$c_x = \cos(\varphi 2)zv2 + \cos(\varphi 3)zv3, \tag{6}$$

$$c_v = zv1 + \sin(\varphi 2)zv2 + \sin(\varphi 3)zv3,$$
 (7)

где $\phi 2$ — угол между осью OX и вектором V2; $\phi 3$ — угол между осью OX и вектором $\overline{V3}$; zv1, zv2 и zv3 — длины векторов $\overline{V1}$, $\overline{V2}$ и $\overline{V3}$, взятые из массива ZV[...]. Dp — окружность, определяющая заданный допуск на точность работы центроискателя, радиус R — значение допуска.

Критерием годности исследуемой конструкции центроискателя является соблюдение неравенства:

$$c_x^2 + c_y^2 \le R^2. (8)$$

Неравенство (8) рекомендуется решать при условии наибольшего отклонения целевого знака центроискателя от центра отверстия (в наихудшем случае), когда одно замыкающее звено соответствует max значению из массива zam_zveno[...], другое — min значению, третье — их среднему значению. Если при данных условиях неравенство выполняется, то 100% устройств будут соответствовать заданной точности.

Результаты исследования и их обсуждение

В качестве исходных данных были выбраны допуски на расположение отверстий реальных крупногабаритных объектов: турбина марки К-300-240-1 (допускаемое отклонение расточек под корпуса подшипников – не более 0,10 мм) и тепловозный дизельный двигатель марки 10Д100 (допускаемое отклонение опор подшипников – не более 0,05 мм) [1, 9].

Значение величины $a_{cp} = 10,03$ для допуска 0,10 мм, что соответствует 6 квалитету. Аналогичный расчет произведен при допуске в 0,05 мм, из которого следует, что составляющие звенья необходимо изготавливать по 5 квалитету. Значение замыкающего звена РЦ определено по рассчитанным квалитетам с использованием разработанной программы.

Расчет, исходя из взаимного влияния опор центроискателя, показывает, что условие (8) выполняется для допуска 0,05 мм при 6 квалитете, а для допуска 0,10 мм — при 7 квалитете соответственно. Результаты представлены в таблице.

Результаты расчетов

исследуемый механизм	заданный допуск,	для составляю- щих звеньев	для замыкающего звена			значение ква- литета исходя
	MM	установленный квалитет	среднее зна- чение, мм	верхнее от- клонение, мм	нижнее от- клонение, мм	из суммарного отклонения
тепловозный двигатель 10Д100	0,05	5	0,034	+0,014	-0,014	6
турбина К-300-240-1	0,10	6	0,051	+ 0,025	-0,025	7

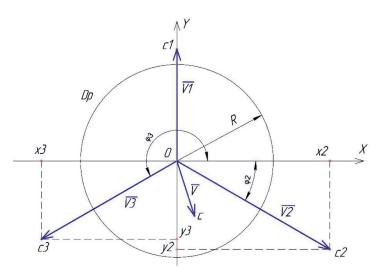


Рис. 3. Схема нахождения результирующего отклонения

Заключение

Разработана математическая модель, которая позволяет оценить точность различных конструкций центроискателей отверстий деталей, как реальных, так и вновь проектируемых, а также оптимизировать допуски на размеры деталей центроискателей аналитическим расчетным методом. Составлен алгоритм и программа для расчета замыкающего звена РЦ по методу Монте-Карло. Проведенные численные исследования математической модели на реальных деталях показали эффективность ее использования для оценки точности центроискателей.

Список литературы

- 1. Алтухов В.Я. Механизация и автоматизация технического обслуживания и ремонта подвижного состава [Текст] / В.Я. Алтухов, А.Ф. Трофименко, А.С. Зенкин. М.: Изд-во Транспорт, 1989.-199 с.
- 2. Валетов В.А. Основы технологии приборостроения [Текст] / В.А. Валетов, В.А. Мурашко. СПб: СПбГУ ИТМО, 2006. 180 с.

- 3. Гаврилов А.В. Программирование на Java [Текст]: Конспект лекций / А.В. Гаврилов, С.В. Клименков, Е.А. Цопа. СПб: СПбГУ ИТМО, 2010. 130 с.
- 4. ГОСТ 2.308-2011. Указания допусков формы и расположения поверхностей [Текст]. Взамен ГОСТ 2.308-79; Введ. с 01.01.12. М.: Стандартинформ, 2012. 25 с.
- 5. Допуски и посадки. Справочник [Текст]: в 2 ч. Ч. 2. 8-е изд., перераб. и доп. / М.А. Палей, А.Б. Романов, В.А. Брагинский и др. СПб.: Политехника, 2001.-608 с.: ил.
- 6. Михайлов Г.А. Численное статическое моделирование. Методы Монте-Карло [Текст]: учеб. пособие для студ. вузов/ Г.А. Михайлов, А.В. Войтишек. М.: Издательский центр «Академия», 2006. 368 с.
- 7. Путято А.В. Расчет размерных цепей [Текст]: учеб.-метод. пособие для студентов технических специальностей / А.В. Путято, А.В. Коваленко.— Гомель: БелГУТ, 2008.-32 с.
- 8. РД 50-635-87. Методические указания. Цепи размерные. Основные понятия. Методы расчета линейных и угловых цепей [Текст]. Взамен ГОСТ 16319-80, ГОСТ 16320-80, ГОСТ 19415-74, ГОСТ 19416-74; Введ. с 01.07.88. М.: Изд-во стандартов, 1987. 44 с.
- 9. СТО 70238424.27.040.009-2009. Турбина паровая K-300-240-1 ЛМЗ. Технические условия на капитальный ремонт. Нормы и требования [Текст]. Введ. с 11.01.10. Москва, 2009. 268 с.
- 10. Табаков С.В. Инженерная геодезия [Текст] / С.В. Табаков, А.А. Постовалова. Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2009. 510 с.