

АНАЛИЗ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТОЧНОСТИ РАСПОЛОЖЕНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗДЕЛИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АППАРАТА ВИНТОВОГО ИСЧИСЛЕНИЯ

Хващевская Л.Ф.

*Иркутский национальный исследовательский технический университет,
Иркутск*

Ключевые слова: высокоточные изделия, производственные погрешности, геометрические допуски расположения, геометрический анализ точности, конфигурационная геометрическая модель размерной цепи, геометрические точностные параметры расположения, винты допусков расположения, собираемость.

Аннотация. Предложен новый подход к обеспечению геометрической точности изделий с учётом источников погрешностей. Введено понятие конфигурационной геометрической модели размерной цепи изделия. Разработаны математические инструменты для проведения анализа и прогнозирования точности расположения элементов изделий в трёхмерном пространстве на её основе. Математическое моделирование проведено с использованием аппарата винтового исчисления. Предлагаемый подход позволит обеспечить точность ключевых геометрических характеристик изделия, а, следовательно, достичь высокого качества изготовления изделий и обеспечить их собираемость.

ANALYSIS AND PREDICTION OF THE ACCURACY OF THE LOCATION OF GEOMETRIC ELEMENTS OF PRODUCTS USING THE APPARATUS OF SCREW CALCULUS

Khvashevskaya L.F.

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk

Keywords: high-precision products, manufacturing errors, geometric location tolerances, geometric analysis of accuracy, configuration geometric model of a dimensional chain, geometric accuracy parameters of the location, location tolerance screws, assembly.

Abstract. A new approach is proposed to ensure the geometric accuracy of products, taking into account the sources of errors. The concept of a configuration geometric model of a dimensional chain of a product is introduced. Mathematical tools have been developed for analyzing and predicting the accuracy of the location of product elements in three-dimensional space based on it. Mathematical modeling was carried out using the apparatus of screw calculus. The proposed approach will ensure the accuracy of the key geometric characteristics of the product, and, consequently, achieve a high quality of manufacturing products and ensure their assembly.

Современное машиностроение характеризуется высоким уровнем применения компьютерных технологий во всех сферах производства, что способствует интеграции проектирования и изготовления. Внедрение концепции «цифровое предприятие», позволит использовать компьютерную модель проектируемого изделия всеми участниками процесса его производства.

Существующие в настоящее время организация и применяемые методы проектирования и разработки новых изделий не соответствуют требованиям скоростного создания высокотехнологичных конструкций. Современные же

условия требуют перехода к скоростным высокоэкономичным методам создания изделий и проектированию их технологических характеристик.

Важнейшей составляющей процесса создания изделия должна стать возможность учитывать вариационную геометрию сборочных единиц. Анализ геометрической точности по номинальным размерам полезен на ранних этапах проектирования для выявления оптимальной конфигурации деталей в изделии и комбинации их размеров, а в случае более сложной сборки – проверки её реализуемости. Однако при таком виде анализа сопрягаемые детали занимают однозначное положение, что не соответствует действительности.

Каждая деталь имеет погрешности размеров и формы, находящиеся в пределах допусков на изготовление. При сборке, соприкасаясь друг с другом, детали образуют пространственные размерные связи. Качество сборки будет зависеть от того, обеспечивают ли пространственные связи данного конкретного узла выполнение функциональных требований к изделию.

Проблема обеспечения геометрической точности изделия с учётом допусков на компоненты предполагает в первую очередь решение проблемы геометрической точности исполнительных поверхностей, а также точности взаимного положения геометрических элементов изделия.

Размерный анализ один из важнейших инструментов создания качественных изделий, способных с высокой надёжностью функционировать в течение всего срока эксплуатации. Поэтому создание и совершенствование методов и моделей для проведения пространственного размерного анализа с учётом допусков на геометрические характеристики изделий, ориентированных на автоматизированное проектирование, является одним из важных направлений при создании высокоточных изделий.

Первые упоминания о проведении размерного анализа в СССР относятся к концу 30-х годов и развиваются в трудах Б.С. Балакшина, Н.А. Бородачёва, П.Ф. Дунаева, И.В. Дунин-Барковского, Ю.Н., Корсакова, Г.М. Гаврилова, Б.М. Базрова и многих других исследователей. Предметом традиционного размерного анализа являются размерные цепи. Теория расчёта размерных цепей, где наряду с расчётом линейных и плоскостных цепей рассматривались пространственные размерные цепи, в её классическом виде изложена П.Ф. Дунаевым в монографии «Размерные цепи». Учет и классификация всех цепей изделия велись графическим методом и в силу сложности оперирования пространственными цепями допускались различные упрощения, часто основанные на практическом опыте и не обоснованные математически.

Развитию теории анализа точности и качества изделий машиностроения посвящены работы многих исследователей: Масягина Б.В., Карепина П.А., Исаева С.В., Непомелуева В.В., Безъязычного В.Ф., Замятина В.К., Богуцкого М.Е., Губаря В.А., Демина Ф.И., Косова М.Г., Кузьмина В.В., Маврикиди Ф.И., Молчанова В.В., Замятина А.В., Шевелева А.С., Шустера В.Г., Березина С.Я., Ильицкого В.Б., Филькина Д.М., Гусева Р.И., Расторгуева Г.А., Скворцова А.В., Семенова А.Н., Журавлёва Д.А., Шабалина А.Н., Гаера М.А., Яценко О.В., Калашникова А.С., Whitney D.E., Chase K.W., Ghie W., Laperriere L., Desrochers A., Polini W. и многих др.

На сегодняшний день для анализа пространственных связей в изделиях с учётом допусков используется аппарат матриц и линеаризованные оценки. Линеаризованный подход к оценке точности геометрических характеристик изделия может приводить к ошибочным прогнозам геометрической точности изделий, а матричный аппарат является вычислительно трудоёмким.

В статье [1] предложен новый подход к анализу пространственных размерных связей в изделиях с учётом допусков, основанный на дифференциально-геометрической классификации допусков: 1) допуски расположения (они характеризуются векторами и ортогональными матрицами, задающими связь реперов); 2) допуски изгиба (они характеризуются в терминах вариаций второй квадратичной формы при неизменности первой квадратичной формы); 3) допуски, связанные с искажением метрики (характеризуются исключительно в терминах первой квадратичной формы). Решение проблемы обеспечения собираемости предполагается на основе использования в анализе конфигурационных пространств деталей.

Каждой поверхности, на которую назначен допуск, поставлено в соответствие определённое конфигурационное пространство. Под конфигурационным пространством поверхности понимается пространство возможных изменений параметров поверхности, полностью характеризующих её отклонение от номинальных размеров и формы при заданных значениях допусков [2]. Каждой точке конфигурационного пространства соответствует определённое положение геометрического элемента (поверхности, линии) в трёхмерном пространстве.

Конфигурационные пространства лежат в основе автоматизированного вариационного анализа пространственных отклонений компонентов сборки [3]. Достоинством такого подхода является тот факт, что результаты трёхмерного анализа представлены в виде диаграммы, отражающей зоны пересечения конфигурационных пространств поверхностей соединяемых деталей, что позволяет визуально представить зоны «неуспешной» сборки с учётом назначенных допусков на компоненты.

К недостаткам этого подхода к анализу пространственных связей в изделиях с учетом допусков следует отнести следующие недостатки:

1) при построении конфигурационных пространств допусков расположения не учитываются взаимосвязи между размерными и геометрическими отклонениями;

2) допуски расположения являются криволинейными;

3) результаты анализа в виде зон «неуспешной сборки» не позволяют управлять точностью ключевых геометрических характеристик расположения элементов изделия.

Анализ современных исследований в области обеспечения точности изделий показывает, что необходимы новые эффективные математические инструменты для проведения полноценного размерного анализа изделий [4].

Новый подход к пространственному анализу точности геометрических характеристик расположения элементов изделия, с учётом допусков, основанный на использовании конфигурационной модели размерной цепи, аппарата бикватернионов [5], был предложен в статье [6].

Основанием для оценки точности с использование аппарата винтового исчисления [7] служит тот факт, что источниками погрешностей сборки являются как производственные источники (приводят к размерным и геометрическим погрешностям), так и контактные (приводят к небольшим кинематическим сдвигам точек геометрических элементов изделий).

Влияние источников вариации в геометрии изделий необходимо учитывать при анализе пространственных размерных связей изделия с учётом допусков. Кроме этого необходимо учитывать взаимосвязи между отклонениями ориентации и месторасположения геометрических элементов изделия.

Конфигурационной геометрической моделью (коротко КГМ РЦ) размерной цепи называем размерную цепь, образованную векторами-звеньями, совокупностью контрольных точек и винтами кумулятивных допустимых отклонений расположения в контрольных точках.

Под контрольными точками (коротко К-точки) будем понимать точки геометрических элементов изделия, от расположения которых зависит точность ключевой геометрической характеристики изделия.

К-точки делятся на две основные группы: опорные К-точки (опорные точки геометрических элементов и базовые опорные точки) и ключевые К-точки (коротко КК-точки) изделия. Расположение ключевых контрольных точек с учётом допусков характеризует геометрическую точность ключевых геометрических элементов деталей.

Точность расположения конечного звена КГМ РЦ с учётом пространственных допустимых отклонений расположения геометрических элементов изделия, входящих в размерную цепь, определяем двумя параметрами: $\Psi_{\Delta\Sigma}$ – величиной кумулятивной допустимой ошибки истинного эйлера перемещения (или конечного перемещения в случае линеаризованной оценки); $\Phi_{\Delta\Sigma}$ – величиной кумулятивной допустимой ошибки истинного эйлера поворота (или конечного поворота в случае линеаризованной оценки).

Допуск расположения определим винтом допуска расположения, и геометрически будем представлять двумя векторами кумулятивных допустимых ошибок расположения $[\bar{\Phi}_{\Delta\Sigma}, \bar{\Psi}_{\Delta\Sigma}]$ конечного звена КГМ РЦ изделия: вектором $\bar{\Psi}_{\Delta\Sigma}$ кумулятивной допустимой ошибки месторасположения конечной точки КРЦ; вектором $\bar{\Phi}_{\Delta\Sigma}$ кумулятивной допустимой ошибки ориентации (рис. 1).

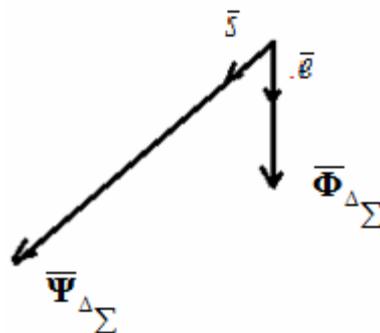


Рис. 1. Геометрическая интерпретация оценки точности геометрической характеристики расположения

При оценке точности расположения контрольной точки КРЦ используем следующие соотношения:

$$\bar{\Psi}_{\Delta\Sigma} = \bar{\Phi}_{\Delta\Sigma} + \bar{\Phi}_{\Delta\Sigma}^0,$$

где $\bar{\Phi}_{\Delta\Sigma}^0$ – вектор кумулятивных допустимых ошибок поступательного перемещения контрольной точки вдоль оси винта кумулятивных допустимых ошибок расположения; $\bar{\Phi}_{\Delta\Sigma}$ – вектор кумулятивных допустимых ошибок ориентации конечного звена КРЦ.

Линеаризованную оценку точности расположения геометрического элемента изделия получаем в виде:

$$\psi_{\Delta\Sigma}^L = \sqrt{|\bar{\Phi}_{\Delta\Sigma}^L|^2 + |\bar{\Phi}_{\Delta\Sigma}^0|^2},$$

параметр $\phi_{\Delta\Sigma}$ при этом рассчитываем по формуле:

$$\phi_{\Delta\Sigma}^L = \arcsin \frac{\Delta_{\Sigma}^L}{a}.$$

При нелинейной оценке получаем:

$$\phi_{\Delta\Sigma} = 2 \cdot \arcsin \frac{\Delta_{\Sigma}}{2a}.$$

Винт кумулятивных допустимых ошибок расположения ключевой контрольной точки геометрического элемента получаем следующим образом:

$$\bar{\mathbf{W}}_{\Delta\Sigma} = \sum_{j=1}^N \bar{\mathbf{W}}_{\Delta\Sigma}(K_j),$$

где $\bar{\mathbf{W}}_{\Delta\Sigma}(K_j)$ – винт кумулятивных допустимых ошибок расположения контрольной точки K_j .

Номинальной геометрии соответствуют нулевые векторы кумулятивных допустимых ошибок, то есть: $\bar{\Psi}_{\Delta\Sigma} = \bar{\mathbf{0}}$, $\bar{\Phi}_{\Delta\Sigma} = \bar{\mathbf{0}}$.

Интерпретация интегральной оценки геометрической точности изделия с учётом допусков расположения представлена на рисунке 2.

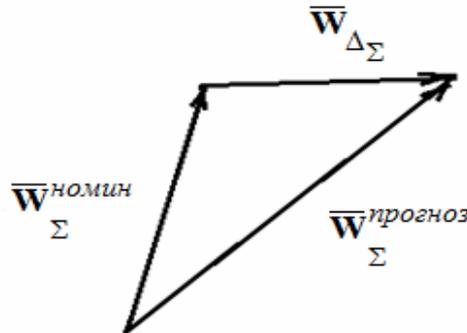


Рис. 2. Интегральная оценка геометрической точности

В статье [6] получены необходимые условия для оценки допустимых отклонений расположения геометрических элементов изделий в соответствии с техническими требованиями, предъявляемыми к их расположению в трёхмерном пространстве.

Предложенный геометрический подход к анализу пространственных связей в изделиях с использованием аппарата винтового исчисления обладает рядом преимуществ:

- учитывает вариационную геометрию геометрических элементов изделия, обусловленную воздействием многочисленных факторов процесса производства;
- позволяет учитывать технические требования к расположению геометрических элементов изделий в трёхмерном пространстве;
- позволяет анализировать нелинейные пространственные связи в изделиях с учётом допусков расположения, а также прогнозировать геометрическую точность изделий;
- обеспечит изготовление высокоточных изделий;
- вычислительно эффективен и геометрически наглядный, а также допускает оцифровку.

Список литературы

1. Журавлёв Д.А. О новых дифференциально-геометрических подходах к автоматизированному проектированию сборок с учётом допусков / Д.А. Журавлёв, П.Я. Грушко, О.В. Яценко // Вестник ИрГТУ. – 2002. – №12. – С. 82-92.
2. Гаер М.А. Конфигурационные пространства поверхностей деталей и сборок / М.А. Гаер, Д.А. Журавлёв, О.В. Яценко // Вестник ИрГТУ. – 2011. – №10. – С. 32-36.
3. Журавлёв Д.А. Методика пространственного размерного анализа в системе ГеПАРД / Д.А. Журавлёв, А.В. Шабалин. – Вестник ИрГТУ. – 2015. – №8. – С. 58-65.
4. Хвощевская Л.Ф. О проблемах пространственного размерного анализа на современном этапе развития машиностроения // Материалы X Международной научно-технической конференции «Авиамашиностроение и транспорт Сибири». – Иркутск, 2018. – С. 241-247.
5. Челноков Ю.Н. Кватернионные и бикватернионные модели и методы механики твёрдого тела и их приложения. Геометрия и кинематика движения. – М.: Физматлит, 2006. – 512 с.
6. Хвощевская Л.Ф., Журавлёв Д.А. Моделирование пространственных допустимых отклонений сборочных единиц с помощью бикватернионов // Вестник ИрГТУ. – 2018. – №11(22). – С. 71-88.
7. Котельников А.П. Винтовое счисление и некоторые приложения его к геометрии и механике. – М.: КомКнига, 2006. – 224 с.

Сведения об авторе:

Хвощевская Любовь Фёдоровна – программист кафедры технологии и оборудования машиностроительных производств.