

Серенков П. С., Спесивцева Ю. Б.

МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ НОРМ ТОЧНОСТИ

*Белорусский национальный технический университет,
Минск, Беларусь*

В комплексной методике проектирования норм точности разработаны алгоритмы проведения проектировочных расчетов для структурных компонентов изделия различной сложности со строгой последовательностью и взаимодействием элементов, что обеспечивает достоверность проектировочных расчетов и объективность принятых конструкторских решений. Типовые алгоритмы-модули подчиняются общим подходам, единым для всех уровней структурной «иерархической пирамиды» изделия и специальным подходам, характерным для структурных компонентов на конкретном уровне иерархии.

Введение. Назначение допусков на параметры – задача, которая решается при проектировании любого изделия и является последним этапом, которому предшествуют разработка концепции, общей компоновки изделия и назначение номинальных значений. Номенклатура параметров определяется назначением изделия, его составом и конструкцией. Эксплуатационные показатели, определяющие качество продукции, зависят в значительной степени от геометрических параметров деталей. Обеспечение требуемой точности размеров, формы и расположения поверхностей, параметров микрогеометрии необходимо для нормальной работы отдельных деталей в соединениях и изделия в целом. При нормировании точности параметров необходимо руководствоваться следующими принципами: полнота охвата, однозначность и оптимальность. Нормы должны быть установлены на все параметры, влияющие на функционирование изделия с учетом экономических критериев. Возникают вопросы: как выявить все функционально важные параметры, как определить их взаимосвязь и учесть особенности? Частично эту проблему решает теория размерного анализа, в основе которой лежит выявление замыкающих звеньев, построение и расчет размерных цепей. Наибольшее применение размерных анализ приобрел при разработке технологических процессов изготовления деталей, позволяя определять припуски на обработку и размеры исходной заготовки. Вопросы размерного анализа рассматриваются во многих изданиях [1–4], в том числе зарубежных англоязычных источниках [5]. Расчет допусков осуществляется в распространенных компьютерных программах (например, HEXAGON Tolerance Package-Software for Tolerance Calculation and Analysis; TOL1. Tolerance Calculation Software; TOLICON. DXF Tool for TOL1-Tolerance Analysis Software; TOLPASS. Dimensioning of ISO Fits; MITCalc- Tolerance analysis). Все современные САПровские пакеты имеют встроенные модули для решения задач расчета допусков (например, Pro/ENGINEER: Tolerance Analysis Extension powered by CETOL Technology is a tolerance analysis application that is integrated with Pro/ENGINEER. With Tolerance Analysis Extension, you can quickly perform 1-D tolerance или MECAMaster for CATIA V5: 3D tolerance calculation). Общим недостатком перечисленных информационных ресурсов является то, что в них мало внимания уделяется выявлению звеньев размерных цепей, оценке их влияния на замыкающее звено, т. е. тем этапам размерного анализа, которые являются индивидуальными для каждого изделия и поэтому сложно формализуются, что особенно существенно для компьютерных программ. Таким образом, исследования, направленные на выявление, классификацию, обобщение и формализацию первых этапов размерного анализа продолжают оставаться актуальными.

Подходы и принципы. В основу разработанной комплексной методики проектирования норм точности положен системный подход метода «Структурирование функции

качества (Quality Function Deployment-QFD)», реализующего поэтапное преобразование пожеланий потребителей сначала в конкретные требования к изделию и его составным частям, затем в требования к производству. По аналогии с QFD алгоритм проектирования норм точности изделия включает последовательное решение задач: анализ обеспечиваемого показателя качества, представление структуры изделия в виде «иерархической пирамиды», позволяющей выявить источники влияющих факторов, оценить их влияние и реализовать расчет составленной параметрической (размерной) цепи. Процедура проектирования норм точности сводится к «послойному» распределению комплексного показателя качества изделия, заданного в виде допускаемого диапазона рассеяния и который, является замыкающим звеном первой параметрической цепи, между влияющими параметрами в соответствии с иерархией структуры изделия.

Диапазон рассеяния параметра может быть ассоциирован с такими понятиями как ошибка, погрешность, неопределенность. С целью гармонизации подходов к количественному выражению требований к точности нами применяется термин «неопределенность», используемый в метрологии.

Методика проектирования норм точности построена на принципах: функциональной декомпозиции, модульного подхода, системности и комплексности. В каждом структурном компоненте (деталь, соединение деталей, конструктивные цепи, функциональные устройства, конструктивные узлы) можно выделить рабочий и базовый элементы, взаимное положение или перемещение которых определяют функциональную точность рассматриваемой структурной единицы.

Процесс проектирования норм точности как алгоритм включает строгую последовательность действий: заданная неопределенность положения/перемещения рабочего элемента изделия или его структурного компонента уровня иерархии i распределяется между влияющих параметров структурных компонентов уровня иерархии $(i + 1)$. Результаты проектирования норм точности на каждом уровне информационной пирамиды являются исходными данными для расчетов на следующих уровнях. Декомпозиция элементов структуры изделия предполагает свойство вложенности применяемых типовых алгоритмов-модулей: нормируемые параметры структурных компонентов изделия уровня иерархии i , в свою очередь, являются целевыми показателями качества для соответствующих структурных компонентов уровня иерархии $(i + 1)$. Процедура проектирования норм точности для каждого структурного компонента любого уровня иерархии сводится к задаче расчета параметрической цепи и включает последовательное решение трех задач: выявление действующих неопределенностей, определение их коэффициентов влияния, комплексирование неопределенностей. Процесс проектирования норм точности структурных компонентов изделия на различных уровнях иерархии в силу очевидных различий имеет свои особенности, которые учитываются в методике.

В основу расчетов положено основное уравнение линейной теории:

$$u_{y\Sigma} = u_{y\text{теор}} + \sum_{s=1}^n u_{yiq_s} ,$$

где $u_{y\Sigma}$ – ожидаемая суммарная неопределенность выходной координаты;

$u_{y\text{теор}}$ – теоретическая составляющая неопределенности;

u_{yiq_s} – частные или приведенные неопределенности влияющих параметров q_s .

Классификация неопределенностей параметров. В зависимости от источника возникновения выделены:

1. Теоретические неопределенности устройств, вызванные допущениями, принимаемыми при проектировании изделий, которые в свою очередь могут быть:

– структурными, относящимися к функциям преобразования движения (вместо строгой теоретической функции используется приближенная для упрощения конструкции устройства);

– параметрическими (численное значение параметра является иррациональным числом, вследствие чего приходится принимать его округленное значение);

– конструктивными (характерны для процесса разработки конструкций при материализации высших контактных пар).

Теоретические неопределенности параметров являются неслучайными, что предусматривает возможность их идентификации, количественной оценки и исключения из общей неопределенности положения/перемещения рабочего элемента изделия или его структурного компонента. Их характеристиками являются только номинальные значения и/или средние отклонения. На теоретические неопределенности допуски не назначают, что влияет на процедуру их определения и комплексирования с другими неопределенностями.

2. Технологические неопределенности параметров деталей, возникающие:

– при изготовлении деталей (отклонения размеров, формы, расположения поверхностей, их шероховатость);

– при сборке (соединения деталей, конструктивные цепи, конструктивные узлы, функциональные устройства).

3. Эксплуатационные неопределенности параметров, возникающие в процессе функционирования изделия:

– отклонения взаимного расположения из-за зазоров в кинематических парах;

– отклонения размеров, формы и расположения из-за силового взаимодействия между элементами кинематических пар (силовые и температурные деформации);

– отклонения размеров, формы и расположения, вызванные износом за счет сил трения в кинематических парах;

– неопределенность мертвого хода, возникающего при реверсивном движении.

4. Неопределенности характеристик свойств материалов деталей, имеющие значение лишь в особых случаях (например, в оптических деталях – неопределенность коэффициента преломления стекла).

По признаку закономерностей проявления действующие неопределенности подразделяют на неслучайные и случайные, характеризующиеся законом распределения, математическим ожиданием и дисперсией.

По признаку закономерностей изменения числовых значений в процессе работы изделия действующие неопределенности подразделяются на постоянные (все виды технологических неопределенностей), переменные регулярные (например, температурные и силовые деформации), переменные нерегулярные (например, смещения в зазорах кинематических пар под действием сил трения и других случайных внешних сил, смещения в слоях смазки, контактные деформации в пределах зоны шероховатостей поверхностей).

По степени определенности направления действия выделены неопределенности: скалярные, имеющие известное направление действия (например, отклонения размеров, силовые деформации при заданном направлении действия силы) и векторные, направление которых всегда неизвестно (например, отклонение от соосности, позиционное отклонение).

Первая задача проектирования норм точности. Выявление всех без исключения источников потенциальных неопределенностей параметров и идентификация среди них действующих составляют первую самую сложную и ответственную задачу проектирования норм точности. В настоящее время существует два подхода к ее решению: аналитический и основанный на экспертных оценках. Аналитический подход, примером которого является метод академика Н. Г. Бруевича не получил широкого практического распространения из-за сложности согласования разных систем координат, в которых рассматриваются отклонения параметров различных деталей.

Для реализации экспертного подхода оценках удобно использовать матрицы влияния, предложенные В. В. Кулагиным, которые представляет собой таблицы, количество строк которых определяется числом подвергаемых анализу неопределенностей, а количество столбцов соответствует количеству выявленных экспертным путем возможных неопределенностей влияющих параметров. Матрицы влияния строятся по мере «послойного» проектирования норм точности для каждого структурного компонента изделия: функциональные устройства, конструктивные цепи, соединения, детали, формируя сеть взаимоподчиненных таблиц. По результатам оценки степеней влияния формируется окончательный массив действующих неопределенностей, и первая задача проектирования норм точности может считаться законченной. Метод позволяет организовать на системном уровне последовательное выявление и анализ на качественном уровне степень влияния возможных источников неопределенностей параметров на неопределенность положения/перемещения рабочего элемента. При этом эксперты используют весь возможный арсенал средств, который применим для данного уровня декомпозиции изделия и для конкретного конструктивного исполнения анализируемого структурного компонента.

Вторая задача проектирования норм точности. Второй задачей проектирования норм точности является определение количественно выраженной степени влияния каждой первичной неопределенности параметра на суммарную неопределенность обеспечиваемого показателя качества. В основу ее решения положена линейная теория точности. «Линейность» предполагает, что связь между результирующей и первичными неопределенностями может быть с достаточной для проектировочных расчетов точностью представлена в виде полинома первой степени, т. е. задача нахождения функции связи сводится к определению коэффициентов влияния действующих первичных неопределенностей.

Источники неопределенностей как и показатели качества различны по своей природе, поэтому и методы определения коэффициентов влияния разнообразны, их можно отнести к двум группам: аналитические и экспериментальные. Все возможные аналитические методы основываются на двух принципиально различных подходах: кинематическом и силовом. Для реализации методов, основанных на кинематическом подходе, определяющими являются: геометрические особенности построения механизма, т. е. вся совокупность геометрических связей между его звеньями, обеспечивающая их относительное взаимное расположение. Для реализации методов, основанных на силовом подходе, в дополнение к учету совокупности геометрических связей рассматриваются силовые воздействия, обеспечивающие движение механизма, что связано с преодолением внутренних сопротивлений и выполнением механизмом полезной работы. На кинематическом подходе основываются следующие известные методы: дифференциальный, относительных неопределенностей, преобразования исходной схемы, плана малых перемещений, геометрический. На силовом подходе основываются методы: фиктивной нагрузки (метод Ю. В. Любатова), плеча и линии действия (метод Н. А. Калашникова). Методы силового подхода не получили широкого практического применения и представляют интерес, только с точки зрения решения задачи, в основу которой положена связь сил и перемещений через мощность.

Дифференциальный метод состоит в том, что параметры изделия или его структурного компонента, входящие в функцию связи, поочередно принимаются переменными аргументами этой функции, и по ним производится операция дифференцирования. Частная производная функции связи по рассматриваемому параметру является коэффициентом влияния действующей неопределенности этого параметра. Метод прост в реализации, не требует дополнительных геометрических построений, но предполагает составление функции связи и ее дифференцирование, что часто затруднительно, а во многих случаях невозможно. Метод не позволяет анализировать неопределенности параметров, номинальные значения которых равны нулю, и параметров, не входящих в функцию связи. Метод не

пригоден для случаев, когда функция связи равна 1, например, для механизма типа «рычажный параллелограмм».

Обязательным условием применения метода относительных неопределенностей является наличие функции связи, представленной произведением сомножителей в степени. Для относительной неопределенности положения/перемещения рабочего элемента изделия или его структурного компонента характерно то, что независимо от принадлежности действующих относительных неопределенностей параметров тому или иному звену, их коэффициенты влияния равны +1 или -1. Таким образом, суммарная относительная неопределенность положения рабочего элемента изделия или его структурного компонента равна алгебраической сумме относительных действующих неопределенностей. Метод прост в реализации, дает возможность анализа и рационального проектирования норм точности неопределенностей различной природы, но может использоваться только для изделий или их структурных компонентов, у которых функция связи представляет собой произведение сомножителей в степени.

Геометрический метод основан на сопоставлении реального механизма, имеющего рассматриваемую действующую неопределенность какого-либо параметра с его номинальным прототипом с помощью геометрических построений. Метод нагляден, прост в реализации, не требует составления функции связи, дает возможность анализа и рационального проектирования норм точности неопределенностей всех типов, что очень важно на уровне конструктивных цепей, соединений, деталей. Метод не всегда эффективен при проектировании норм точности на уровне преобразующих функциональных устройств и изделий.

Третья задача проектирования норм точности. Комплексирование неопределенностей осуществляется при решении прямой (определение допусков составляющих звеньев исходя из допуска замыкающего звена) и обратной (проверочный расчет) задач параметрических цепей.

Существует два пути обеспечения точности замыкающего звена: метод полной и неполной взаимозаменяемости. При методе неполной взаимозаменяемости процесс проектирования норм точности параметрической цепи выполняется по специальному алгоритму с использованием различных видов компенсации, к которым можно отнести различные способы регулирования и подгонки звеньев.

Комплексирование случайных составляющих неопределенности осуществляется методом максимума-минимума, предполагающим, что все составляющие звенья цепи будут иметь действительные отклонения, равные предельным в наихудшем сочетании и вероятностным методом, при котором учитывается случайный характер звеньев цепи.

На практике возможны следующие условия, приводящие к существенному снижению достоверности проектировочных расчетов при использовании классических расчетных формул:

1. Законы распределения параметров составляющих и замыкающего звеньев отличаются от нормальных.

2. Законы распределения параметров составляющих и замыкающего звеньев близки к нормальному, но с явно выраженной асимметрией по отношению к соответствующим полям допусков.

3. Диапазоны рассеяния параметров составляющих и замыкающего звеньев не совпадают со значениями соответствующих допусков.

Предложено использовать расчетные зависимости, учитывающие особенности составляющих звеньев параметрической цепи.

Увязывание по номинальным значениям:

$$A_{\Sigma}^0 = \sum_{i=1}^n C_i \cdot A_i^0.$$

Увязывание по средним отклонениям:

$$em_{\Sigma} = \left[\sum C_i \cdot (em_i + \alpha_i \cdot T_i) \right] - \alpha_{\Sigma} \cdot T_{\Sigma}.$$

Увязывание по допускам:

$$T_{\Sigma}^2 = \frac{1}{K_{\Sigma} \cdot K_{\Sigma \text{прив.}}} \cdot \sum_{i=1}^n C_i^2 \cdot T_i^2 \cdot K_i^2 \cdot K_{i \text{прив.}}^2,$$

где A^0 – номинальное значение параметров замыкающего и составляющих звеньев;

em – среднее отклонение замыкающего и составляющих звеньев;

T – допуск замыкающего и составляющих звеньев;

C_i – коэффициент влияния i -го составляющего звена;

α – коэффициент относительной асимметрии замыкающего и составляющих звеньев;

K – коэффициент относительного рассеяния замыкающего и составляющих звеньев;

$K_{\text{прив}}$ – коэффициент приведения к нормальному закону распределения замыкающего и составляющих звеньев.

Для проектировочных расчетов норм точности имеются рекомендации по выбору значений используемых коэффициентов, а также возможность учета характера составляющих звеньев (скалярные, векторные, «сопряжения с зазором», функционально-зависимые).

Также в методике нашли отражение компенсирование неопределенностей параметров цепи, используемые если заданную точность положения/перемещения рабочего элемента изделия или его структурного компонента невозможно достичь методами полной взаимозаменяемости по экономическим или иным причинам. Рассмотрены принципиальные и технические ограничения применения компенсирования в параметрических цепях.

Заключение. Разработанная комплексная методика проектирования норм точности позволяет формализовать и рационально планировать организацию работ над изделиями любого уровня сложности, выбирать решения по обеспечению заданного уровня точности изделия из обоснованно полного множества подходов. Методика не претендует на законченность как с позиций алгоритма проектирования норм точности, так и с позиций применяемых методов и средств. Ее основное назначение – создание методической основы для организации процесса проектирования как системной формализованной процедуры, предписывающей последовательность операций, корректную постановку задач, но не ограничивающей инженера в методах и средствах их решения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дунаев, П. Ф. Расчет допусков размеров / П. Ф. Дунаев, О. П. Леликов. – М.: Иновационное машиностроение, 2021. – 400 с.
2. Солонин, И. С. Расчет сборочных и технологических размерных цепей / И. С. Солонин, С. И. Солонин. – М.: Машиностроение, 1980. – 110 с.
3. Цепи размерные. Основные понятия, методы расчета линейных и угловых цепей: РД 50-635-87 / И. М. Колесов, Е. И. Луцков., А. И. Кубарев и др. Ввод в действие с 1.07.88. – М.: Изд-во стандартов, 1987. – 45 с.
4. Размерный анализ конструкций: справочник / С. Г. Бондаренко [и др.]; под общ. ред. канд. техн. наук С. Г. Бондаренко. – Киев: Техника, 1989. – 150 с.
5. Wilhelm, R. G. Computer Methods for Tolerance Design / Robert G. Wilhelm, Stephen C.-Y. Lu. – World Scientific Publishing Company, 1992. – 160 p.

Поступила 17.10.2023