

Е.А. Польский к.т.н, доц., докторант
Брянский государственный технический университет, (Россия)

МОДЕЛЬ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТОЧНОСТИ СБОРОЧНЫХ СОЕДИНЕНИЙ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА РАЗМЕРНЫХ СВЯЗЕЙ

В работе приводится методика проведения размерного анализа, позволяющая анализировать технологические и эксплуатационные размерные связи в конструкциях машин. В процессе решения практических задач возможна реализация одноступенчатого обеспечения требуемой точности функциональных параметров, а также учет последующей эксплуатации и определение оптимальной долговечности работы отдельных деталей.

Размерный анализ является эффективным инструментом для расчета геометрической точности конструкций машин. С его помощью можно определять номинальные значения, отклонения и допуски размеров, рассчитывать нормы точности и разрабатывать технические условия на машины и их составные части, выполнять анализ правильности простановки размеров и отклонений на рабочих чертежах деталей, рассчитывать межоперационные размеры, припуски, определять необходимую точность приспособлений и т. д.

Несмотря на достаточно хорошо разработанную теорию проведения размерно-точностного анализа имеется ряд направлений требующих дальнейшего развития. В частности, недостаточно рассмотрен вопрос связанный с выполнением анализа конструкций машин с учетом их последующей эксплуатации и, прежде всего, изнашивания и контактных деформаций сопряженных поверхностей. Размерный анализ и анализ погрешностей изготовления деталей машин выполняется отдельно, несмотря на их явную взаимосвязь. В результате при проведении размерного анализа технологических процессов точность технологических размеров назначают исходя из рекомендаций справочной литературы без учета реальных условий производства.

Все это приводит к погрешностям размерного анализа проектируемых машин, а, следовательно, и к снижению надежности обеспечения заданных параметров точности, лимитирующих показатели качества. Такая ситуация привела к необходимости дальнейшего совершенствования размерно-точностного анализа с

учетом функционального назначения и эксплуатации машин, а также параметров и условий изготовления ее составных частей.

В настоящее время последовательность проведения размерного анализа осуществляется в два этапа [1, 2]: расчет конструкторских размерных цепей и расчет технологических размерных цепей. При этом можно выделить следующие типы размеров:

- конструкторские размеры, обеспечивающие точность функциональных параметров изделия;
- технологические размеры, обеспечивающие необходимую точность конструкторских размеров при изготовлении деталей изделия.

Постоянное повышение требований к качеству проектирования, при одновременной необходимости ускорения темпов выполнения этих работ, приводит к необходимости параллельной разработки документации при выполнении мероприятий конструкторско-технологической подготовки производства и создания единых конструкторско-технологических отделов. В результате создаются предпосылки реализации принципа одноступенчатого проектирования – технологического обеспечения требуемых эксплуатационных показателей машин и их надежности при одновременном проектировании технологии механической обработки с уточнением параметров сборки.

Принцип одноступенчатого проектирования для обеспечения точности конструкций предполагает управление точностью непосредственно элементами разрабатываемых технологических процессов изготовления и сборки. Это особенно актуально при проектировании машин в мелкосерийном и единичном производстве, так как в этом случае обычно не разрабатывается весь комплекс документации, предусмотренной ЕСКД, а сама разработка проектов (несложных) осуществляется силами одного-двух инженеров.

На рис. 1а приведен пример размерной цепи, формирующей осевой зазор между торцом зубчатого колеса и простановочным кольцом, являющийся конструкторским требованием по обеспечению работоспособности узла.

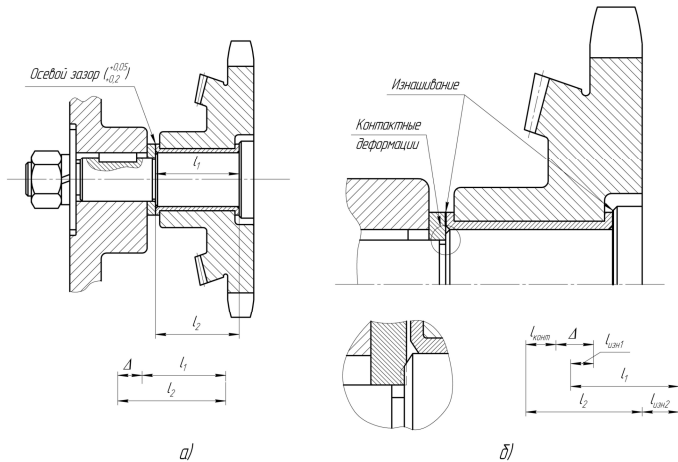


Рис. 1. Формирование точности функционального размера: а) простая конструкторская размерная цепь; б) конструкторская размерная цепь, с включенными в нее эксплуатационными звеньями

При эксплуатации размерные связи не остаются постоянными [1, 3]. На машину будут воздействовать внешние и внутренние факторы, которые приводят к потере точности. Такие воздействия необходимо учитывать для комплексного обеспечения точности, поэтому для размерных цепей необходимо выделить еще одну группу размеров – эксплуатационные размеры. Они описывают дополнительные размерные связи, возникающие при эксплуатации изделия. Включение эксплуатационных размеров в конструкторские размерные цепи, позволяет обеспечивать требуемую точность функциональных параметров в течение заданной долговечности изделия.

На рис. 1б изображены несколько дополнительных эксплуатационных звеньев. Так в процессе сборки при затяжке фиксирующей гайки возникают усилия, приводящие к определенной величине контактных деформаций. Также в процессе эксплуатации имеет место изнашивание торцов блока-шестерни и оси, причем характер износа для двух торцов будет различным, учитывая реальное распределение эпюры давления в зоне контакта.

Каждый составляющий конструкторский размер, формируется в процессе изготовления деталей: либо непосредственно при получении заготовки, либо при последующей обработке (чаще всего механической со снятием припусков). Для этого детали определенным образом ориентируются относительно инструментов или неподвижных

частей станков. При этом точность конструкторских размеров достигается различными технологическими методами: совмещением, постоянством или последовательной сменой баз [2, 4].

На рис. 2 показана обработка торцовых поверхностей блока-шестерни. Конструкторский размер l_1 в соответствии с принятым технологическим процессом обработки формируется следующей размерной цепью: S_{1-1}, S_{1-2}, A .

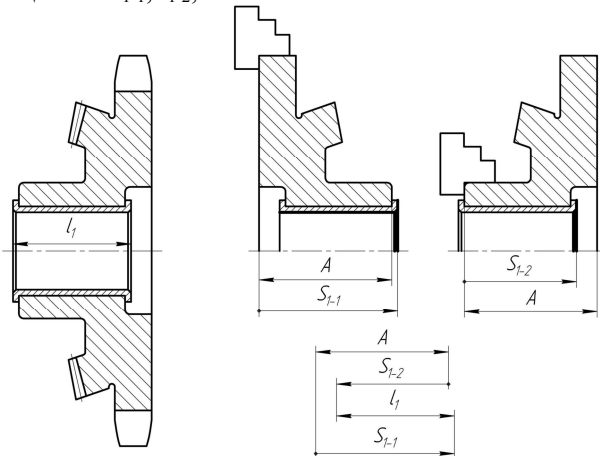


Рис. 2. Технологическая размерная цепь

Для учета основных технологических факторов, оказывающих влияние на формирование суммарной погрешности обработки можно выделить в еще одну группу размеров и на их базе построить новую схему расчета. При проектировании технологического процесса определяются параметры операционных размеров и припусков, а также при необходимости размеры заготовки. Неточность выполнения операционных размеров (равная допуску или меньшая его) связана с наличием элементарных погрешностей обработки. Так на рис. 3 представлена размерная цепь формирования операционного размера S_2 .

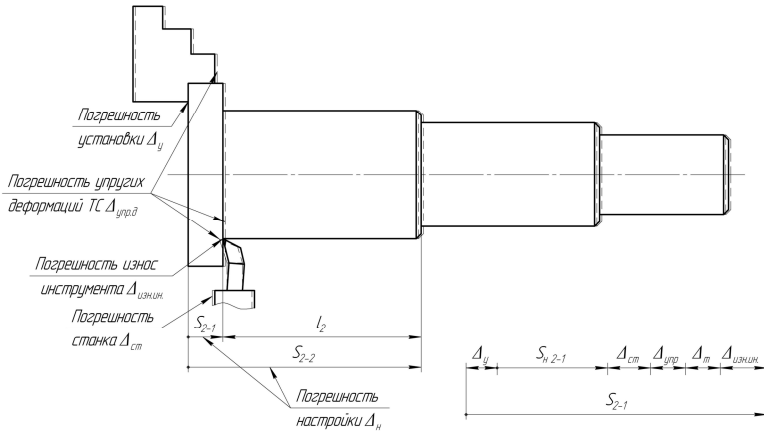


Рис. 3. Линейная размерная цепь формирования операционного размера

На этом рисунке представлена простейшая линейная размерная цепь. Это означает, что величины всех элементарных погрешностей обработки рассматриваются в направлении выдерживаемого размера.

В общем случае суммарная погрешность Δ_{Σ} состоит из некоторой совокупности элементарных составляющих погрешностей.

$$\Delta_{\Sigma} = \Delta_{\text{сист}} + \Delta_{\text{сл}},$$

где $\Delta_{\text{сист}}$ – систематические погрешности в процессе обработки, $\Delta_{\text{сл}}$ – случайные погрешности в процессе обработки.

Учитывая систему формирования суммарной погрешности обработки, формирующей допуск (точность) операционного размера, можно легко представить размерную цепь для каждого операционного размера. В нее входят настроечный размер S_n (с допуском равным погрешности настройки), а также остальные элементарные погрешности, которые необходимо учитывать в рассчитываемой технологической системе. Постоянные систематические погрешности имеют номинал равный их величине, рассчитанной по соответствующей зависимости. При этом допуск равен погрешности используемой расчетной схемы. Для остальных элементарных погрешностей рекомендуется принимать номинальный размер равным нулю, а в допуске учитывать ее величину с учетом погрешности расчета. Это позволяет вводить коррекцию постоянных систематических погрешностей в операционный настроечный размер.

Для более точного определения погрешностей обработки необходимо составлять пространственные размерные цепи, включающие в себя элементы технологической системы.

В общем случае, в размерном анализе участвуют размеры, которые определяют положение одних деталей относительно других (элементов технологической оснастки) или относительное положение различных поверхностей одной и той же детали (рис. 4). В реальном производстве эти размеры нельзя получить идеально точными, т.к. при обработке всегда имеют место технологические погрешности.

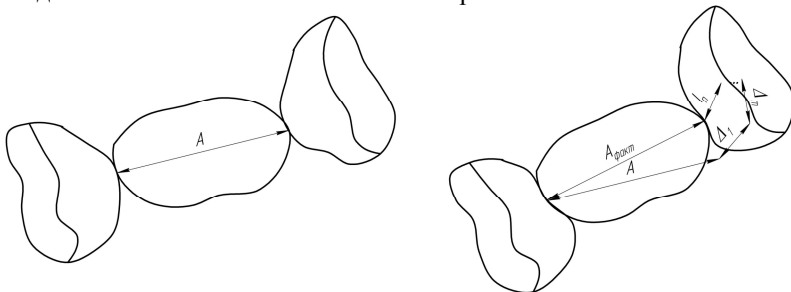


Рис. 4. Формирование реальных размеров деталей машин

$$A = \sum S ; A_{изг} = \sum S + \sum \Delta_{изг} ;$$

$$A_{факт} = \sum S + \sum \Delta_{изг} + \sum I_{экс} ;$$

где A , $A_{изг}$, $A_{факт}$ – конструкторские размеры; $\sum S$ – система идеальных технологических размеров, определяемая схемами базирования на технологических операциях в процессе изготовления детали ; $\sum \Delta_{изг}$ – элементарные погрешности изготовления; $\sum I_{экс}$ – погрешности, появляющиеся при эксплуатации машины.

Можно легко проследить связь описанных выше типов размеров и построить общую расчетную схему. В результате появляется возможность выполнения размерного анализа, обеспечивающего требуемую точность всех функциональных размеров в течение заданного срока эксплуатации изделия.

В общем виде, используя матричную форму представления, это можно записать в виде выражения:

$$\{T_{\Delta}\} = [A_{ji}] \cdot \{T\} ,$$

где $[A_{ji}]$ – матрица, содержащая частные производные, $\{T_{\Delta}\}$ – вектор-столбец, содержащий допуск замыкающего звена, $\{T\}$ – вектор-столбец, состоящий из допусков составляющих размеров цепи.

Для включения в расчетную схему эксплуатационных размеров необходимо в расчетную схему ввести либо дополнительную передаточную функцию в виде тензора второго порядка (матрицы), либо дополнительное составляющее звено, что позволяет учесть изменение векторов размеров и углов в процессе эксплуатации.

В первом случае новый вектор получается из исходного после умножения на дополнительную передаточную функцию. Для плоских размерных цепей это квадратная матрица 2-го порядка, для пространственных – 3-го.

Само уравнение векторного контура размерной цепи имеет вид [5]:

$$[R_1][M_1][R_2][M_2] \dots [R_i][M_i] \dots [R_n][M_n][R_f] = [H],$$

здесь $[H]$ – вектор-столбец замыкающего звена, $[R]$ – матрицы суммарных поворотов, равные произведению матриц поворотов вокруг соответствующих осей.

Вторым этапом является введение в размерную цепь новых составляющих размеров, которые будут описывать изменение размерных связей в процессе эксплуатации.

В матричном виде при решении методом максимум-минимум:

$$\{T_{\Delta}\} = [A]\{T\} + [E]\{T_{эк}\}.$$

Предлагается использовать оба подхода. Для расчета допуска замыкающего звена (обратная задача) или при определении допусков составляющих размеров по заданному значению замыкающего (прямая задача) более наглядно для составления размерных цепей и более удобно при непосредственной работе с ними рекомендуется использовать дополнительные эксплуатационные звенья. В тоже время для автоматизации расчета коэффициентом передаточных отношений сложных пространственных размерных цепей лучше использовать матричную форму представления размерных уравнений контура.

В результате могут быть назначены предельные отклонения размеров цепи.

$$T_{\Delta} = \sum_i^n c_i T_{Si} + \sum_j^m c_j T_{узj} + \sum_k^l c_k k_{внутk} k_{внешk} k_{Тэк} + \sum_p^q c_p k_{внутp} k_{внешp} k_{\Delta p} k_{Тэк}$$

где c – коэффициенты передаточных отношений; T_s , $T_{уз}$ – допуски конструкторских размеров и элементарных погрешностей обработки; $k_{внут}$, $k_{внеш}$, k_{Δ} , $k_{Тэк}$ – коэффициенты, формирующие допуски эксплуатационных размеров, соответственно для внутренних и внешних факторов, долговечности, точности расчетной схемы, используемой для определения параметров эксплуатационных свойств.

Значения дополнительных эксплуатационных звеньев являются функциями, которые определяется внешними и внутренними факторами. К внешним можно отнести условия эксплуатации: величина и характер нагрузки, скоростные режимы, планируемая долговечность и др. К внутренним факторам – параметры, которые

определяют эксплуатационные свойства сопряженных поверхностей: материал деталей, смазка, параметры качества поверхностного слоя и др.

Так же эксплуатационные размеры в ряде случаев могут быть зависимыми от значений технологических размеров деталей. Такая связь может осуществляться, например, через изменение нагрузки в сопряжении в результате варьирования размеров конструкторского требования. При необходимости это можно учесть выбором соответствующей модели расчета эксплуатационных свойств сопряженных поверхностей деталей (функциональной или корреляционной).

Такое выделение из эксплуатационного допуска $k_{внеш j}$ $k_{внут j}$ удобно при выполнении прямого размерного анализа. Вместе с коэффициентами передаточных отношений, эти новые коэффициенты позволяют сравнивать относительную значимость воздействия различных эксплуатационных звеньев на точность замыкающего звена. Другими словами, можно видеть, к каким поверхностям предъявляются более высокие требования (по точности для обычных технологических звеньев, и по параметрам качествам поверхностного слоя для эксплуатационных). Это позволяет находить резервы повышения точности замыкающих звеньев и управлять через соответствующие параметры и характеристики конструкции или технологического процесса.

Также следует обратить внимание на характер эксплуатационных звеньев. Их можно разделить на звенья, имеющие условно постоянный размер, и звенья, имеющие условно переменный размер во времени. К первым относятся эксплуатационные размеры, связанные с деформациями контактирующих поверхностей, а ко вторым – с изнашиванием поверхностей. При этом переменный во времени размер является некоторой постоянной величиной для всего периода эксплуатации узла или машины.

В зависимости от того, как предполагается эксплуатировать машину или узел (а также с учетом повышения технологичности при ремонте), в качестве критерия оптимизации можно принять одинаковую долговечность всех деталей сборки или кратную по узлам. В первом случае размерный расчет допусков эксплуатационных звеньев деталей первого и второго типа не отличается. Аналогом является расчет на равнопрочность всех деталей сборки.

Использование различной долговечности деталей в узле или узлов в машине позволяет управлять точностью замыкающих звеньев сборки и тем самым находить экономически оптимальный вариант

межремонтного обслуживания. Наличие ремонтов с заменой деталей потерявших точность позволяет уменьшать допуски эксплуатационных звеньев и тем самым облегчать обеспечение заданной точности машины (на этапе расчета конструкторской цепи):

$$T_{\Delta} = \sum_i^n c_i T_i + \sum_j^m c_j k_{\text{внут}_j} k_{\text{внеш}_j} k_{T_{\text{эк}_j}} + \sum_k^l c_k k_{\text{внут}_k} k_{\text{внеш}_k} k_{\text{ок}_k} k_{T_{\text{эк}_k}}$$

Решение прямой задачи размерного анализа по этому уравнению требует оптимизации с учетом затрат не только на изготовление и эксплуатацию, но и на ремонт, а также связанный с ним простой оборудования.

При использовании дополнительного составляющего звена необходимо определить его величину и направление. Эти параметры будут зависеть от вида эксплуатационного звена. Номинальный размер удобно принимать равным нулю, а в допуске задавать весь диапазон возможного варьирования. Например, особенностью звена изнашивания сопряженных поверхностей является то, что оно изменяется от нуля до некоторого U_{max} . Поэтому можно принять номинал этого размера равным нулю, а допуск - U_{max} , куда входят следующие составляющие: U_I – минимальный линейный или угловой износ за некоторый временной промежуток; U_{II} – колебание линейного или углового размера звена износа обусловленное изменением формы изношенных поверхностей, определяемый типом сопряжения и характером его изнашивания; U_{III} – колебание линейного или углового размера, обусловленное погрешностью расчетной схемы (за счет минимальных и максимальных значений параметров).

Особенностью звеньев, описывающих контактные деформации, является различие величины и характера деформаций при первом и повторными нагружениями. Поэтому для этих звеньев можно принять номинал равным величине контактных деформаций при первом нагружении, когда происходят пластических деформации, а допуск размера равным величине повторных контактных деформаций. Соответствующее задание эксплуатационного звена приводит к тому, что оно начинает оказывать соответствующее воздействие при расчете коэффициентов передаточного отношения. Однако такое воздействие не всегда будет существенным в виду малости пластических контактных деформаций, и поэтому тут также можно задавать номинал равным нулю, а допуск – общему диапазону варьирования.

Предложенная модель обладает рядом преимуществ по сравнению с традиционным выполнением размерного анализа в два этапа. В

модели одноступенчатого размерного анализа обеспечение заданной точности осуществляется комплексным расчетом размерных связей с учетом обеспечения требуемой работоспособности узла (точность замыкающего звена сборочной размерной цепи), его долговечности, а также учетом проектируемой технологии изготовления и сборки (выбор технологических баз и расчет точности межоперационных размеров, учет погрешностей обработки) и условий последующей эксплуатации.

Расчет точности функциональных размеров отдельных конструктивных элементов деталей проводится с анализом отклонений формы и расположения контактирующих поверхностей, изменения размеров при эксплуатации (износ, контактные деформации и др.), а проектирование операционных размеров увязывается с типом применяемого оборудования (универсальное, копировальное, с ЧПУ и др.). Непосредственно комплексное управление точностью изделия осуществляется в следующих направлениях: на основе конструктивных решений (выбор особенностей конструкции, точности замыкающего звена), подбора материалов деталей с соответствующими эксплуатационными характеристиками, выбора методов и условий обработки деталей изделия (тип и точность станков, применяемые приспособления, инструмент, последовательность выполнения операций, типы баз и др.), принятие решений по особенностям технического обслуживания (например, выбор типа смазки), долговечности отдельных деталей и др. Все это повышает качество проектирования машины и прежде всего надежность обеспечения их требуемой точности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дунаев, П.Ф. Расчет допусков размеров/ П.Ф. Дунаев, О.П. Леликов. – М. : Машиностроение, 2001. 304 с.
2. Шамин, В.Ю. Теория и практика решения конструкторских и технологических размерных цепей: учеб. пособие./ В.Ю. Шамин. – Челябинск: Изд-во ЮУГГУ, 1999. – 429 с.
3. Качество машин: справочник: в 2 т./ А.Г. Суслов, Э.Д. Браун, Н.А. Виткевич [и др.]. – М. : Машиностроение, 1995. – Т. 1. – 256 с.
4. Базров, Б.М. Расчет точности машин на ЭВМ/ Б.М. Базров. – М.: Машиностроение, 1984. – 256с.
5. Huang, M.F. Dimensional and geometrical tolerance balancing in concurrent design/ M.F. Huang, Y. Zhong// Int J Adv Manuf Technol. – 2008. – N35. – С. 723–735.