

### **скорости $\omega$ и тока $I_a$ двигателя в начале линейного участка траектории**

При движении по дуге окружности на вход подается заданное значение скорости, и перестраиваются значения коэффициентов в цепях обратной связи. Они могут быть рассчитаны методом размещения полюсов, так чтобы обеспечить монотонный характер изменения скорости с заданным начальным ускорением [3]. Следует отметить, что криволинейные участки располагаются в середине траектории (движение начинается с линейного участка), поэтому на практике к концу линейного участка устанавливается требуемая скорость за счет управления током, и на криволинейном участке она поддерживается постоянной, поэтому имеет место только нормальное ускорение за счет движения по окружности.

Учитывая вышеизложенное, можно сделать вывод, что предложенный способ управления приводом перемещения мобильного робота на основе адаптивного регулятора позволяет обеспечить движение с ограниченным ускорением на всех участках траектории, что позволяет транспортировать штабелированные объекты без опрокидывания.

#### **Список цитированных источников**

1. Буда, Я. Автоматизация процессов в машиностроении / Я. Буда, В. Гановски, В. Вихман [и др.]; под ред. А.И. Дашенко. – М.: Высшая школа, 1991. – 435 с.
2. Накано, Э. Введение в робототехнику: Пер. с японск / Э. Накано. – М.: Мир, 1988. – 334 с.
3. Филипс, Ч. Системы управления с обратной связью / Ч. Филипс, Р. Харбор.– М.: Лаборатория базовых знаний, 2001. – 356 с.

УДК 621.91.002

**Олехник М.А.**

**Научный руководитель: доцент Медведев О.А.**

## **ТЕОРЕТИКО-ВЕРОЯТНОСТНЫЙ ПРОЕКТНЫЙ РАСЧЕТ УГЛОВЫХ РАЗМЕРНЫХ ЦЕПЕЙ**

Проектирование надежных и точных машин, эффективных техпроцессов сборки и механической обработки их комплектующих деталей невозможно без комплексного размерного анализа объектов проектирования на основе выявления и решения конструкторских и технологических размерных цепей. На основе проектных расчетов размерных цепей можно определить технически обоснованные требования к точности размеров комплектующих деталей, исходя из требуемой точности важных функциональных геометрических параметров машины, формирующихся при ее сборке, а также определить точность выполнения технологических размеров, исходя из точности чертежных размеров детали при ее механической обработке.

Методика проектных расчетов линейных размерных цепей достаточно подробно разработана и описана в учебной и специальной технической литературе [2 и др.]. В то же время, вопросом выявления и решения угловых размерных цепей уделяется неоправданно мало внимания, несмотря на ряд объективных факторов, определяющих их важность:

- в большинстве случаев требуемый уровень точности размеров, опреде-

ляющих угловое положение поверхностей деталей сборочных единиц (отклонение от перпендикулярности, параллельности, наклона поверхностей, торцевого биения и др.) значительно выше уровня точности линейных размеров, связывающих указанные поверхности. В соответствии с ГОСТ 24643-81, допуски формы и расположения не должны превышать определенной доли допуска соответствующего линейного размера (от 25 до 60 %);

- для достижения высокой точности угловых замыкающих размеров при сборке, технически затруднительно использовать методы пригонки, регулирования, селективной сборки. Эта точность обычно достигается методами полной и неполной взаимозаменяемости, что предполагает достаточную высокую точность получения угловых размеров при изготовлении деталей;

- точность углового положения поверхностей деталей при механической обработке так же обеспечивается методами полной и неполной взаимозаменяемости и зависит от точности угловых положений элементов станков, приспособлений, инструментов, так как на большинстве металлорежущих станков отсутствуют механизмы точной регулировки угловых положений рабочих органов.

Таким образом, во многих случаях проектные расчеты угловых размерных цепей имеют приоритетное значение для обеспечения точности сборки машин и изготовления деталей.

Несмотря на то, что основные положения теории линейных размерных цепей приемлемы и для угловых размерных цепей, расчеты последних не находят широкого применения в практике проектирования машин и техпроцессов. Это объясняется трудностями выявления, восприятия и изображения схем угловых размерных цепей, своеобразием построения системы допусков угловых размеров и отсутствием методики проектных расчетов, пригодных для практики.

Основой проектного расчета любой размерной цепи является способ распределения допуска замыкающего звена на составляющие звенья. По аналогии с линейными размерными цепями для угловых цепей целесообразно использовать способ равноточных допусков, то есть допуски всех составляющих звеньев принимать по одной степени точности. Используемые на практике способ подбора составляющих допусков и способ равных допусков имеют существенные недостатки. Бессистемный подбор допусков углов требует больших затрат времени. Принимая равные допуски на угловые размеры при разной длине границ углов, можно назначить на углы с длинными сторонами технически и экономически неприемлемый уровень точности. Более рационально допуск на составляющий угловой размер определять с учетом длин его границ, также как допуски на составляющие звенья линейных цепей определяют с учетом их номиналов, ограничивая разнообразие допусков одним качеством.

Метод равноточных допусков может быть реализован для угловых размерных цепей при условии, что правила построения стандартной системы угловых допусков, позволяют получить выражение для расчета номера степени точности (одинаковой для всех составляющих звеньев) в зависимости от допуска замыкающего звена, длин границ углов и параметров системы допусков.

Несмотря на то, что система допусков параллельности, перпендикулярности, наклона, торцевого биения и система допусков углов регламентируется разными стандартами (ГОСТ 24643-81 и ГОСТ 8908-81 соответственно), они построены по единым принципам, имеют одинаковые интервалы длин, набор

степеней точности и значений допусков (при выражении допусков углов в линейных единицах в виде катета). Это позволяет использовать метод равноточных допусков для решения размерных цепей, имеющих в качестве составляющих звеньев как углы, так и отклонения от перпендикулярности, параллельности, торцевого биения и наклона.

Анализ принципов построения указанных систем стандартных допусков позволил разработать математическое выражение для расчета номера степени точности составляющих звеньев угловой размерной цепи.

Значение угловых допусков изменяются в пределах одной степени точности, в зависимости от значения длины меньшей стороны угла по ряду предпочтительных чисел Ra10 с коэффициентом геометрической прогрессии  $\gamma = \sqrt[10]{10} \approx 1,25$ . В пределах одного интервала длин допуски изменяются в зависимости от степени точности по ряду предпочтительных чисел Ra5 с коэффициентом геометрической прогрессии  $\varphi = \sqrt[5]{10} \approx 1,6$ . [1,2]

С учетом указанных принципов построения системы допусков, любое значение стандартного допуска можно выразить формулой

$$AT_i = AT_1 \cdot \varphi^{n-1} \cdot \gamma^{m-1}, \quad (1)$$

где  $AT_1=0,4$  мкм – исходный минимальный допуск для первой степени точности и первого интервала длин;

$n$  – номер степени точности допуска;

$m$  – номер интервала минимальной длины стороны нормируемого угла.

В то же время границы интервалов длин в системе допусков сами являются членами геометрической прогрессии с коэффициентом  $\varepsilon = \sqrt[5]{10} \approx 1,6$  в зависимости от номера интервала [1]. Тогда верхняя граница любого интервала длин может быть определена по формуле

$$L_i = L_1 \cdot \varepsilon^{m-1}, \quad (2)$$

где  $L_1$  – верхняя граница первого интервала длин.

После логарифмирования уравнения (2) найдем выражение для  $m-1$

$$\ln L_i = \ln L_1 + (m-1) \cdot \ln \varepsilon;$$

$$m-1 = \frac{\ln L_i}{\ln \varepsilon} - \frac{\ln L_1}{\ln \varepsilon}.$$

Тогда

$$AT_j = AT_1 \cdot \gamma^{\frac{\ln L_j}{\ln \varepsilon}} \cdot \left( \gamma^{\frac{1}{\ln \varepsilon}} \right)^{\ln L_j} \cdot \varphi^{n-1} = B \cdot C^{\ln L_j} \cdot \varphi^{n-1} \quad (3)$$

Для упрощения формулы (3) приняты обозначения постоянных множителей, не зависящих от  $j$ :

$$B = AT_1 \cdot \gamma^{\frac{\ln L_1}{\ln \varepsilon}} \text{ и } C = \left( \gamma^{\frac{1}{\ln \varepsilon}} \right).$$

Достижение точности сборки замыкающих звеньев размерных цепей методом неполной взаимозаменяемости позволяет уменьшить требования к точ-

ности размеров деталей, входящих в размерные цепи, при сохранении основных преимуществ полной взаимозаменяемости. На составляющие звенья назначаются расширенные допуски, поэтому у некоторой части изделий замыкающее звено может выйти за пределы заданного допуска. Если доля таких бракованных изделий невелика, то сумма затрат на изготовление неточных деталей и дополнительных затрат на исправление брака будет значительно меньше расходов на точные детали, необходимые для метода полной взаимозаменяемости. В таком случае неполная взаимозаменяемость предпочтительнее.

Составляющие звенья являются размерами деталей, которые при механической обработке на настроенных станках формируются как случайные величины. Тогда замыкающее звено, как алгебраическая сумма составляющих звеньев, также является случайной величиной. Большинство законов распределения, которым подчиняются размеры обработанных деталей, характеризуются тем, что значения случайной величины близкие к границам поля рассеяния возникают значительно реже, чем значения близкие к середине поля рассеяния. У суммарной случайной величины такой характер распределения выражен еще сильнее, так как сочетание крайних значений слагаемых еще менее вероятно. Благодаря этому часто удается получать незначительные доли брака при существенном расширении допусков составляющих звеньев.

Для установления взаимосвязи между допустимой долей брака, полями рассеяния, параметрами распределения замыкающего и составляющих звеньев используют законы теории вероятностей, поэтому метод расчета размерной цепи, обеспечивающий неполную взаимозаменяемость, называется теоретико-вероятностным. Уравнение для расчета номера степени точности угловых составляющих звеньев составим на основе выражения (3) и принятого для теоретико-вероятностных расчетов линейных размерных цепей соотношения поля рассеяния замыкающего звена и полей рассеяния составляющих звеньев (4) [3, 4]:

$$\omega_{\Delta}^2 = t_{\Delta}^2 \cdot \sum_{j=1}^p \omega_j^2 \cdot \lambda_j^2, \quad (4)$$

где  $\omega_{\Delta}$  – поле рассеяния замыкающего звена;  $\omega_j$  – поле рассеяния  $j$ -го составляющего звена;  $t_{\Delta}$  – коэффициент риска для замыкающего звена;  $\lambda_j$  – коэффициент относительного рассеяния  $j$ -го составляющего звена;  $p$  – число составляющих звеньев цепи.

При использовании формулы (4) для расчета угловых размерных цепей в качестве  $\omega_{\Delta}$  и  $\omega_j$  необходимо использовать соответствующие поля рассеяния углов, приведенные к одинаковой базовой длине. Для упрощения последующих выражений принимаем значение базовой длины 1 мм. Тогда приведенное значение поля рассеяния каждого углового звена получится, делением его поля рассеяния на длину его малой стороны.

Из теории вероятностей известно, что если случайная величина является суммой большого числа взаимно независимых случайных величин, среди которых нет доминирующих по величине, то независимо от законов распределения слагаемых, сумма имеет распределение, близкое к нормальному. Поэтому замыкающее звено, являющееся алгебраической суммой большого числа составляющих звеньев можно считать распределенной по нормальному закону и, используя таблицу функции Лапласа, определять коэффициент  $t_{\Delta}$  в

зависимости от экономически приемлемой доли бракованных изделий.

Распределение существенно положительных отклонений расположения поверхностей деталей машин (эксцентриситет, отклонения от параллельности, отклонения от перпендикулярности, отклонение от соосности, торцовое и радиальное биения) подчиняются закону эксцентриситета (закону Релея), и поэтому для составляющих звеньев угловых размерных цепей следует принимать коэффициент относительного рассеяния  $\lambda_j = 0,1337$  [3,4].

При наличии в размерной угловой цепи стандартных составляющих звеньев, поля рассеяния  $\omega_{jcm}$  (допуски) которых регламентируются стандартами, степень точности следует определить только для остальных составляющих звеньев. Поэтому правую часть уравнения (4) разделим на сумму стандартных и нестандартных полей рассеяния и подставим во вторую сумму вместо  $\omega_j$  выражение (3) для  $TA_j$ .

$$\omega_{\Delta}^2 = t_{\Delta}^2 \cdot \sum_{j=1}^{p_c} \omega_{jc}^2 \cdot \lambda_{jc}^2 + t_{\Delta}^2 \cdot \sum_{j=1}^{p_n} \omega_j^2 \cdot \lambda_j^2 = t_{\Delta}^2 \cdot \sum_{j=1}^{p_c} \omega_{jc}^2 \cdot \lambda_{jc}^2 + t_{\Delta}^2 \cdot B^2 \cdot \varphi^{2(n-1)} \sum_{j=1}^{p_n} \frac{C^{2 \ln L_j}}{L_j} \cdot \lambda_j^2 \quad (5)$$

Преобразуем уравнение (5) так, чтобы в левой части равенства оказался множитель, содержащий степень точности  $n$ , одинаковую для всех нестандартных звеньев

$$\varphi^{2(n-1)} = \frac{\omega_{\Delta}^2 - t_{\Delta}^2 \cdot \sum_{j=1}^{p_c} \omega_{jc}^2 \cdot \lambda_{jc}^2}{t_{\Delta}^2 \cdot B^2 \cdot \sum_{j=1}^{p_n} \frac{C^{2 \ln L_j}}{L_j} \cdot \lambda_j^2} \quad (6)$$

После логарифмирования и выделения в левой части равенства степени точности  $n$  получим

$$n = \frac{1}{2 \ln \varphi} \cdot \left[ \ln \left( \omega_{\Delta}^2 - t_{\Delta}^2 \cdot \sum_{j=1}^{p_c} \omega_{jc}^2 \cdot \lambda_{jc}^2 \right) - \ln \left( t_{\Delta}^2 \cdot B^2 \cdot \sum_{j=1}^{p_n} \frac{C^{2 \ln L_j}}{L_j} \cdot \lambda_j^2 \right) \right] + 1 \quad (7)$$

Найденное значение номера степени точности следует округлить до ближайшего меньшего целого значения и по нему назначить поля рассеяния на составляющие угловые звенья по таблицам допусков углов (по ГОСТ 8908-81) или допусков перпендикулярности, параллельности, торцового биения и наклона (по ГОСТ 24643-81).

Сумма назначенных допусков, приведенных к единой базовой длине 1 мм, не должна превышать приведенного допуска замыкающего звена.

Выражение, полученное для расчета номера степени точности, может быть полезно инженерам-конструкторам для обоснованного определения допусков угловых размеров деталей машин, для обеспечения при сборке точности важных функциональных геометрических параметров методом неполной взаимозаменяемости.

#### Список цитированных источников

1. Единая система допусков и посадок СЭВ в машиностроении и приборостроении: Справочник: в 2 т. – М.: Издательство стандартов, 1989. – Т1. – 220 с.
2. Точность и производственный контроль в машиностроении: Справочник / Под общ. ред. А.К. Кутая. – М: Машиностроение, 1983. – 367 с.
3. Солонин, И.С. Расчет сборочных и технологических размерных цепей / И.С. Солонин, С.И. Солонин. – М.: Машиностроение, 1980. – 110 с.
4. Бородачев, Н.А. Анализ качества и точности производства. - М.: Машгиз, 1946. – 252 с.