Московский государственный технический университет
им. Н. Э. Баумана

В. Н. Баранов, Ю. А. Кокорев, В. А. Жаров

РАСЧЕТ ТОЧНОСТИ И ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВЗАИМОЗАМЕНЯЕМОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ И УЗЛОВ ПРИБОРНЫХ УСТРОЙСТВ

Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана
1994

-21/

Московский государственный технический университет
им. Н.Э.Баумана

В.Н.Баранов, Ю.А.Кокорев, В.А.Жаров

РАСЧЕТ ТОЧНОСТИ И ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВЗАИМОЗАМЕНЯЕМОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ И УЗЛОВ ПРИБОРНЫХ УСТРОЙСТВ

Утверждено редсоветом МГТУ
в качестве учебного пособия
по курсу "Основы конструирования приборов"

НТБ МГТУ им. Н.Э.Баумана
216790R
Ретрофонд

Издательство МГТУ им.Н.Э.Баумана
1994

ББК 34.9
Б83

Рецензенты: В.А.Вышлов, О.Ф.Тищенко

Б83 Баранов В.Н., Кокорев Ю.А., Жаров В.А. Расчет точности и обеспечение взаимозаменяемости элементов и узлов приборных устройств: Учеб. пособие. – М.: Изд-во МГТУ, 1994. – 88 с., ил.

ISBN 5-7038-1177-5

Приведены расчеты на точность приборных устройств и функциональных узлов при проектировании. Даны рекомендации по обеспечению и повышению показателей качества приборных устройств на разных этапах разработки конструкции. Представлены примеры расчета приборных устройств и функциональных узлов. Приводятся справочные материалы.

Предназначено для студентов 2-го и 3-го курсов приборных специальностей МГТУ им. Н.Э.Баумана.

Табл. 8. Ил. 14. Библиогр. 16 назв.

ББК 34.9

ISBN 5-7038-1177-5

© МГТУ им. Н.Э.Баумана, 1994.

ВВЕДЕНИЕ

Современные тенденции развития народного хозяйства, науки и техники ставят задачи по разработке новых и усовершенствованию существующих изделий самого различного назначения при одновременном повышении требований к их качеству. Решение этих задач в приборостроении, как правило, связано с включением в приборные устройства (ПУ) большого числа элементов и узлов (оптических, электрических, механических, электронных и др.), работающих на использовании различных физических явлений. Усложнение схем и конструкций приборных устройств, а также стремление получать изделия высокого качества в максимально короткие сроки с минимальными затратами на проектирование и освоение производства заставляют разработчика все более широко использовать расчетные методы при проектировании.

Необходимые виды расчетов устанавливаются разработчиком в каждом конкретном случае в соответствии с назначением устройства, а также количественными и качественными показателями, регламентирующими его работу. Для точных ПУ главным показателем качества является точность, которая регламентируется допуском в соответствии с назначением устройства. Поэтому при проектировании точных устройств разработчик хотя и держит в поле зрения все остальные требования, предъявляемые к ПУ, но все-таки ,в первую очередь,стремится обеспечить выполнение показателей точности, а затем уже и других показателей.

Задача расчета на точность требует комплексного подхода. Ее решение связано с решением таких вопросов, как выбор показателей точности, рациональных методов достижения требуемой точности и установление обоснованных требований к точности функциональных узлов (ФУ) и их элементов, исходя из заданного техническими условиями допуска на точность устройства, возможностей производства и требований к конструкции ПУ.

При выполнении точностного расчета разработчик встречается с определенными трудностями, обусловленными не только большим количеством погрешностей, сложностью их выявления и

учета, но и недостаточной разработанностью вопросов расчета на точность сложных устройств на разных этапах проектирования.

Цель настоящего пособия – рассмотреть весь комплекс вопросов, связанных с выполнением расчетов на точность при проектировании сложных устройств. В пособии приведены основные показатели точности ПУ, рассмотрены погрешности, влияющие на качество ПУ, и их источники. Представлены различные способы, позволяющие установить как частичное, так и суммарное воздействие первичных погрешностей, схемы и конструкции устройства на интересующий разработчика показатель качества и, следовательно, оценить правильность выбора схемотехнических элементов, конструкторских и технологических решений.

Значительное внимание уделено вопросам, связанным с выполнением проектного и проверочного расчетов ПУ на точность на разных этапах проектирования. Даются рекомендации по рациональному разделению ПУ на ФУ и определению исходных данных для расчета точностных цепей. Анализируются методы достижения необходимой точности ПУ с учетом требований производства и конструкции.

Рассматриваемые в пособии подходы и методы расчета на точность в известной мере носят общий характер и могут успешно применяться для расчета сложных ПУ независимо от их элементной базы.

I. ПОКАЗАТЕЛИ И ХАРАКТЕРИСТИКИ КАЧЕСТВА ПРИБОРНЫХ УСТРОЙСТВ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ УЗЛОВ

Для современного приборостроения характерным является неуклонное повышение требований к качеству производимой продукции. Качество продукции – это совокупность свойств продукции, обусловливающих ее способность удовлетворять определенные потребности в соответствии с ее назначением. Качество приборного устройства отражает его способность выполнять свое функциональное назначение в соответствии с техническими условиями.

В общем случае ПУ представляет собой сложное устройство (рис. I), состоящее из электрических, механических, оптических и других функциональных узлов и элементов. С их помощью осуществляется многоступенчатая передача и преобразование входного сигнала x (например, оптического, электрического, механи-

ческого и т.п.) в выходной сигнал y требуемого вида или физической природы. Каждое реальное ПУ в отличие от идеального выполняет свою функцию приближенно, с отклонениями показателей его качества (погрешностями), которые характеризуют потери информации (сигнала).

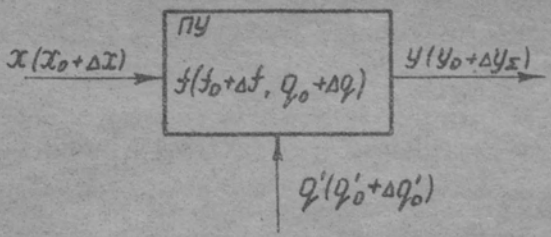


Рис. I

Качество ПУ оценивают показателями, которые характеризуют технико-экономические особенности ПУ и указаны в техническом задании (ТЗ). Такими показателями качества для ПУ являются: надежность, масса, объем, точность функционирования, технологичность конструкции и т.д. Кроме указанных выше общих показателей, для характеристики качества ПУ используются и специальные показатели, применяемые для ПУ определенного функционального назначения, например для оптических ПУ используется такой показатель, как качество изображения, для радиоприемных устройств – качество звука и т.д.

Под точностью ПУ обычно понимают степень приближения реальных зависимостей (параметров) к некоторым идеальным зависимостям (параметрам), для воспроизведения которых это устройство предназначено. Точность устройства характеризуется погрешностью соответствующего показателя качества на выходном звене и выражается как алгебраическая разность

$$\Delta y_\Sigma = y - y_0 , \qquad (I)$$

где y – действительное значение показателя качества; y_0 – номинальное значение показателя качества.

При этом отклонения интересующих разработчика показателей качества не должны превышать допустимых значений (допусков), устанавливаемых ТЗ на проектирование ПУ, т.е. для изделий тре-

буемого качества должно выполняться условие

$$\Delta y_{\Sigma} \leqslant [\delta_0 S], \qquad (2)$$

где $[\delta_0 S]$ - допустимое отклонение показателя качества.

В общем случае погрешность функционирования ПУ обусловливается потерями информации еще до поступления на входное устройство (элемент) прибора, в приборе и при регистрации результатов.

Доприборные погрешности характеризуются допущениями в отношении объекта, сигнала или канала прохождения сигнала. Их выявляют на начальных этапах проектирования с учетом назначения ПУ.

Приборные или инструментальные погрешности обусловлены потерями информации в электронных, механических, оптических и других преобразователях сигнала из-за допущений в функции преобразования сигнала (это так называемые схемные теоретические погрешности), погрешностей сборки, из-за разброса свойств материалов, влияния эксплуатационных погрешностей и факторов (сил трения, температуры и т.п.).

Погрешности регистрации связаны не только с объективными параметрами, но и с возможностями оператора. Часто погрешности регистрации не выделяют в отдельную группу и относят или к методическим, или к инструментальным эксплуатационным погрешностям, в зависимости от природы их проявления. Например, погрешности считывания относят к эксплуатационным инструментальным погрешностям, погрешности обработки результатов - к методическим, погрешности настройки относят к тем и другим.

Рассмотренные погрешности относятся непосредственно к выполняемой ПУ функции и определяют его качество. Однако при работе ПУ на него могут воздействовать и влияющие факторы (например, влажность, вибрация, нагрев, электрические и магнитные поля, давление и др.), которые оказывают нежелательное дополнительное воздействие на показатели качества.

В общем случае погрешность ПУ равна алгебраической сумме указанных погрешностей

$$\Delta y_{\Sigma} = \Delta y_{\Delta x} + \Delta y_{\Delta q} + \Delta y_{\Delta p} + \Delta y_{\Delta q'}, \qquad (3)$$

где $\Delta y_{\Delta x}$ - доприборная погрешность; $\Delta y_{\Delta q}$ - инструмен-

тальная погрешность; $\Delta y_{\Delta p}$ – погрешность считывания; $\Delta y_{\Delta q'}$ – погрешность от влияющих факторов.

Как показано выше, погрешность ПУ определяется комплексом погрешностей, возникающих при разработке его конструкции, изготовлении и эксплуатации. Каждая из составляющих погрешности ПУ (доприборная, приборная и др.), в свою очередь, определяется большим количеством разнообразных погрешностей и факторов, вызванных различными причинами. Погрешности, влияющие на качество ПУ, будем называть первичными погрешностями и факторами. Они представляют собой отклонения от номинальных значений параметров деталей, элементов и сборочных единиц, узлов, каскадов (Δq), из которых состоит само устройство; изменения влияющих факторов ($\Delta q'$); отклонения от расчетных значений функции преобразования сигнала (Δf) и отклонения информативных параметров входного сигнала от его номинальных значений (Δx). Указанные погрешности и факторы определяются по формулам

$$\Delta q = q - q_0; \quad \Delta q' = q' - q'_0; \quad \Delta f = f - f_0; \quad \Delta x = x - x_0, \quad (4)$$

где с индексом даны номинальные значения соответствующего параметра или фактора, а без индекса – его действительные значения.

Основное внимание в настоящей работе будет уделено инструментальным погрешностям, оказывающим наибольшее влияние на качество ПУ.

Для оценки качества ПУ используют различные показатели качества, характеризующие потери информации при преобразовании сигналов от объектов всеми функциональными устройствами прибора.

Показателями точности функционирования ПУ являются:

погрешность ПУ – разность между действительным и расчетным (идеальным) значениями информативного параметра выходного сигнала, соответствующими информативному параметру входного сигнала;

погрешность функционирования ПУ – разность между действительным и расчетным (идеальным) изменениями информативного параметра выходного сигнала ПУ, соответствующими изменению информативного параметра входного сигнала;

погрешность воспроизводимости ПУ – разность действительных значений информативного параметра входного сигнала ПУ, соответствующих одному и тому же информативному параметру входного сигнала при повторных циклах функционирования.

Как видно из определений понятий показателей точности ПУ, установление его погрешностей связано со знанием идеальных значений параметров выходного сигнала (в дальнейшем будем обозначать их соответствующей буквой с индексом "0"), относительно которых рассматривают действительные значения выходной величины. Под идеальным будем понимать ПУ, все элементы которого имеют номинальные значения параметров. Для идеального ПУ значения Δx, Δf, Δq и $\Delta q'$ равны нулю.

Указанные выше показатели качества являются весьма обобщенными и поэтому пригодны для характеристики широкого класса приборных устройств с различными видами функциональных узлов и схемотехнических элементов различного назначения. Это обстоятельство позволяет распространить известные методы теории точности для точностного анализа и проектирования ПУ.

Процесс проектирования ПУ многозначен. Этим объясняется большое количество ПУ, с помощью которых может быть достигнуто решение одной и той же задачи. При этом по своей структуре, схемотехническому составу ПУ могут существенно различаться. Это приводит к тому, что разные ПУ различным образом реагируют на одни и те же влияющие факторы и погрешности. Поэтому одной из задач точностного расчета является точностная оптимизация возможных структурных схем и рациональный выбор схемотехнических элементов. Современное ПУ представляет собой сложную систему, состоящую из большого числа простых и сложных функциональных узлов. Разработка подобных ПУ ведется в соответствии с принципами агрегатного проектирования, т.е. по отдельным функционально законченным узлам, из которых затем компонуется само устройство. Инструментальная погрешность ПУ определяется погрешностями составляющих функциональных узлов

$$\Delta y_{\Sigma} = \Delta y_{опт} + \Delta y_{мех} + \Delta y_{эл} + \Delta y_{пн} + \dots ,$$

где $\Delta y_{опт}$ – погрешность оптических функциональных узлов; $\Delta y_{мех}$ – погрешность механических устройств; $\Delta y_{эл}$ – погрешность электрических (электронных) узлов (каскадов);

$\Delta y_{пн}$ – погрешность пневматических устройств и др.

Следовательно, обеспечение заданной точности работы ПУ сводится к определению и обеспечению необходимой точности выходных параметров входящих в данное ПУ функциональных узлов (каскадов).

Необходимо отметить, что механические узлы вносят бо́льшую погрешность по сравнению с другими функциональными узлами. Этим во многом определяется значительный интерес к разработке теории точности механических устройств.

Введенные выше показатели точности функционирования ПУ распространяются и на точные механические устройства. Однако на практике для механических ПУ с подвижными системами вместо понятий погрешность ПУ и погрешность функционирования устройства используют адекватные им понятия погрешность (ошибка) положения $\Delta y_{п}$, и погрешность (ошибка) перемещения $\Delta y_{пер}$.

Погрешность положения механизма определяется разностью между действительным и идеальным (номинальным) значениями выходной координаты механизма ПУ при заданном значении входной координаты или разным положением ведомых звеньев реального и идеального механизмов при одинаковом положении ведущих звеньев (рис. 2а)

$$\Delta y_{п} = y - y_{0}, \qquad (5)$$

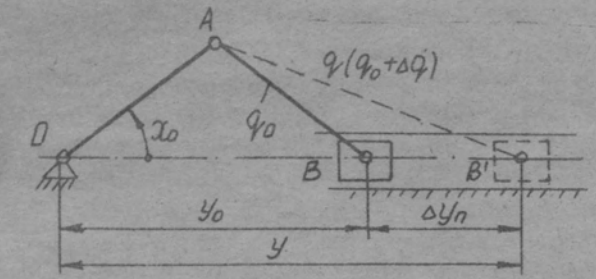
где y и y_{0} – действительное и идеальное значения выходной координаты соответственно.

Погрешность положения механизма характеризует точность выработки абсолютного значения заданной функции.

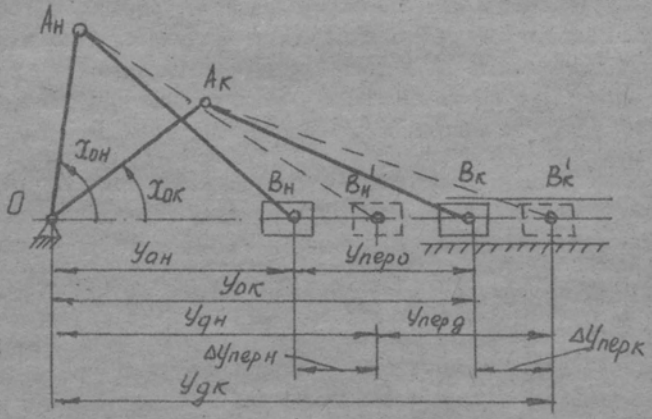
Погрешность перемещения механизма (ПУ) – это разница перемещений ведомых звеньев действительного и идеального механизмов соответственно при одинаковых перемещениях ведущих звеньев обоих механизмов

$$\Delta y_{пер} = y_{пер.д} - y_{пер.о}, \qquad (6)$$

где $y_{пер.д}$ и $y_{пер.о}$ – действительное и идеальное перемещения ведомых звеньев (рис. 2б).



а



б

Рис. 2

Поскольку $y_{пер.д} = y_{д.к} - y_{д.н}$, а $y_{пер.о} = y_{к.о} - y_{н.о}$, то

$$\Delta y_{пер} = y_{пер.д} - y_{пер.о} = y_{д.к} - y_{д.н} - y_{к.о} + y_{н.о} = (y_{д.к} - y_{к.о}) - (y_{д.н} -$$

т.е. значение погрешности перемещения равно разности погрешностей положения в конце и начале движения. Погрешность перемещения ведомых звеньев действительного и идеального механизма, обусловленная не только первичными погрешностями, но и неточностью ввода входной координаты, называется полной.

Следует отметить, что если погрешность ПУ и погрешность функционирования ПУ нейтральны относительно природы погрешностей и их размерности, то погрешности положения

и перемещения показывают физическую природу погрешностей и их размерность.

Кроме указанных фундаментальных понятий, для характеристики точности используют погрешности воспроизводимости (неповторяемости) и мертвого хода.

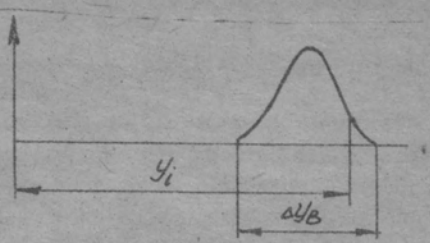


Рис. 3

Под погрешностью воспроизводимости понимается разность выходных координат реального устройства, соответствующих одним и тем же положениям входного элемента при повторении цикла функционирования (рис. 3). Погрешности воспроизводимости определяют по формуле

$$\Delta y_в = y_i - y_0 , \qquad (7)$$

где y_i и y_0 – действительное и номинальное значения выходной координаты соответственно.

Погрешности воспроизводимости при реверсировании (или при двустороннем позиционировании выходного элемента) получили название погрешностей мертвого хода. Погрешность мертвого хода возникает из-за наличия зазоров в кинематических парах или упругих деформаций звеньев механизма ПУ и определяется разностью выходных координат устройства, соответствующих одним и тем же положениям

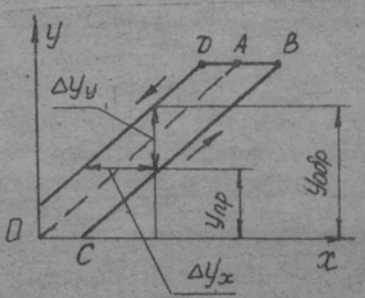


Рис. 4

входного элемента при реверсировании движения (рис. 4), т.е. при изменении направления движения ведущего звена

$$\Delta y_{x,y} = y_{пр} - y_{обр}, \qquad (8)$$

где $y_{пр}$ и $y_{обр}$ – действительные значения выходной координаты при прямом и обратном ходах для одного и того же положения ведущего звена.

Погрешности мертвых ходов являются самостоятельными характеристиками точности механизма ПУ и в ряде случаев регламентируются самостоятельным допуском, отдельным от допуска на погрешности перемещения. Погрешности перемещения вызывают погрешности в скорости и ускорении механизмов.

Под погрешностями скорости и ускорения механизма понимают соответственно разницу в скоростях и ускорениях ведомого звена действительного и идеального механизма (ПУ) при одинаковых скоростях и ускорениях движения ведущих звеньев. Погрешности ускорений приводят к дополнительным усилиям и динамическим погрешностям, возникающим в реальном ПУ.

Одним из важных показателей качества устройства является точностная технологичность конструкции, которая для точного приборостроения характеризуется тремя уровнями точности допусков для изготовления деталей и сборки: экономическим, производственным и техническим. Экономическому (Э) уровню точности соответствует точность, получаемая в серийном производстве при изготовлении деталей на автоматическом и универсальном оборудовании с помощью типового инструмента, оснастки и приспособлений. Сборка выполняется без пригонок и регулировок. Контроль изделий производится с помощью цехового инструмента (калибров, индикаторов и т.д.). Для точного приборостроения экономическому уровню соответствуют допуски по 8...11 квалитетам точности. Производственному (П) уровню соответствует точность, получаемая в серийном производстве на универсальном оборудовании, но с применением специального инструмента, оснастки и технологических процессов. Сборка изделий осуществляется с регулировкой и пригонкой. Производственному уровню соответствуют допуски по 6...7 квалитетам. Техническому (Т) уровню соответствует предельная точность, которая может быть достигнута с помощью специального оборудования, инструмента и технологических процессов. Сборка изделий осуществляется с ре-

гулировками и пригонками. Контроль производят, как правило, с помощью лабораторных средств измерения (микроскопами, интерферометрами и т.д.). Этому уровню точности соответствуют допуски по 4...5 квалитетам. Средние значения уровней точности для наиболее распространенных технологических процессов и деталей, а также требования к точности даны в табл. I. В табл. 2 приведены уровни точности технологических процессов сборки [I0].

Таблица I

Уровни точности технологических процессов

Тип поверхности, размера, детали	Вид погрешности	Вид техпроцесса	Уровни точности		
			Э	П	Т
I	2	3	4	5	6
Цилиндрические наружные поверхности (валики, оси, ролики)	Погрешность диаметра	Токарная (чистовая) обработка	II-й квалитет	8-й квалитет	-
		Шлифование	8-й квалитет	6-й квалитет	5-й квалитет
		Доводка	-	-	До 2 мкм
	Несоосность	Механическая обработка	7-я степень точности	6-я степень точности	5-я степень точности
		Доводка	-	-	До 2 мкм
Цилиндрические внутренние поверхности (втулки)	Погрешность диаметра	Токарная (чистовая) обработка	II-й квалитет	8-й квалитет	-
		Развертывание	8-й квалитет	7-й квалитет	6-й квалитет
		Шлифование	8-й квалитет	7-й квалитет	6-й квалитет
		Доводка	-	-	До 2 мкм

Продолжение табл. I

I	2	3	4	5	6
	Несоосность	Механическая обработка	7-я степень точности	6-я степень точности	5-я степень точности
		Доводка	-	-	До 2 мкм
Конические поверхности	Погрешность угла конуса	Токарная (чистовая)	IO-я степень точности	7-я степень точности	-
		Шлифование	7-я степень точности	6-я степень точности	-
		Доводка	-	-	5-я степень точности
Плоскости	Погрешность формы	Фрезерование (чистовое)	8-я степень точности	7-я степень точности	-
		Шлифование	6-я степень точности	5-я степень точности	-
		Шабрение	-	-	5-я степень точности
		Доводка	-	-	4-я степень точности
Линейные размеры	Погрешность размера	Обработка резанием	II-й квалитет	8-й квалитет	-
		Шлифование	8-й квалитет	6-й квалитет	-
		Доводка	-	-	5-й квалитет
		Сборка с регулировкой	8-й квалитет	6-й квалитет	5-й квалитет

Продолжение табл. I

I	2	3	4	5	6
Межосевые расстояния	Погрешность размера	Разметка	0,2 мм	0,I мм	–
		Сверление по кондуктору	0,05 мм	0,02 мм	–
		Сверление, растачивание на координатных станках	–	–	До 5 мкм
		Сборка с регулировкой	0,05 мм	0,02 мм	До 5 мкм
Угловые размеры	Погрешность размера	Механическая обработка	I0-я степень точности	7-я степень точности	6-я степень точности
		Доводка	–	–	До 5"
		Сборка с регулировкой	7-я степень точности	6-я степень точности	5-я степень точности
Зубчатые и червячные колеса	Кинематическая погрешность	Фрезерование обкаткой	8-я степень точности	7-я степень точности	–
		Шевингование	–	–	5-я степень точности
		Прикатка	–	–	6-я степень точности
Зубчатые рейки и червяки	Накопленная погрешность шага	Резание	20 мкм	I0 мкм	–
		Шлифование	I0 мкм	5 мкм	До 2 мкм

Окончание табл. I

I	2	3	4	5	6
Резьбы винтовых механизмов	Накопленная погрешность шага	Токарная чистовая	3-й класс	2-й класс	-
		Шлифование	2-й класс	I-й класс	0-й класс
		Доводка	-	-	До 2 мкм
Кулачки	Погрешность радиуса-вектора	Фрезерование	0,05 мм	0,03 мм	-
		Шлифование	0,02 мм	0,0I мм	-
		Доводка	-	-	До 5 мкм
Шкалы и лимбы	Погрешность деления	Деление на машинах и автоматах	I0 мкм I'	5 мкм 0,5'	I мкм До I"

Таблица 2

Уровни точности технологических процессов сборки

Уровень точности	Содержание процесса сборки			Достижимая точность	
	Виды контактных пар	Виды регулировок	Виды подгонок	для длин, мкм	для углов, угл. с
I	2	3	4	5	6
Экономический	Низшие; классы $P_3 \dots P_5$	Простое согласование положений	-	I0	60
Производственный	Все классы	Точное согласование положений, компенсация погрешностей	Шабрение, совместная притирка	I	I0...25

Окончание табл. 2

I	2	3	4	5	6
Технический	Все классы	Точное согласование положений, компенсация погрешностей	Индивидуальные доводки, пригонки	0,I	2...5

На практике считают, что конструкция устройства является технологичной для всех видов производства, если для ее изготовления требуются экономический и производственный уровни точности. Конструкция считается нетехнологичной, если к ее изготовлению предъявляются требования выше технического уровня.

На этом закончим рассмотрение показателей точности ПУ. Существуют и другие более сложные показатели, но все они, как и указанные выше, могут быть выявлены, если известны погрешности положения. В свою очередь, погрешности положения являются следствием наличия в действительных механизмах так называемых первичных погрешностей. Поэтому выявление первичных погрешностей и их источников является весьма важным этапом при разработке ПУ требуемого качества.

2. ПОГРЕШНОСТИ, ВЛИЯЮЩИЕ НА КАЧЕСТВО ПУ, ИХ ИСТОЧНИКИ И ХАРАКТЕРИСТИКИ

Как указано выше, на качество ПУ влияет большое количество различных первичных погрешностей и факторов. Для управления качеством продукции уже на ранних стадиях необходимо иметь представление об ожидаемых погрешностях и их источниках, о характере их проявления, для того, чтобы целенаправленно воздействовать на организацию производства и конструирования изделия.

2.I. Источники погрешностей точных ПУ

Источники погрешностей точных ПУ, РЭА, ОЭП подразделяются на три основные группы [2, 5, 8-I2]:

I. Допущения, принимаемые при проектировании ПУ.

2. Технологические погрешности параметров деталей, электрических и радиоэлементов, погрешности сборки узлов и каскадов.

3. Эксплуатационные погрешности (погрешности, возникающие в процессе работы).

Наиболее часто в функции преобразования сигнала встречаются допущения, связанные с использованием приближенной функции преобразования сигнала вместо точной, с конструированием высших кинематических пар, а также с округлением параметров элементов конструкции, например, из-за требований стандартов. Погрешности от допущений называют теоретическими.

Источниками производственных погрешностей являются: несовершенство технологических процессов, погрешности оборудования, инструмента, измерений, недостаточная квалификация рабочего и др.

Источниками эксплуатационных погрешностей для механических устройств являются зазоры в кинематических парах, деформации деталей (вследствие действия силы тяжести деталей, сил, возникающих при сборке статически неопределенных конструкций, изменений температуры окружающей среды или самих деталей), действия сил трения (они вызывают износ, смещение в зазорах), а также изменение свойств деталей во времени (износ, старение).

Для немеханических элементов ПУ существуют свои источники погрешностей.

Основными источниками погрешностей электрических элементов ОЭП, РЭА являются: нестабильность напряжения питания, отклонения параметров электро- и радиоэлементов (сопротивлений, емкостей, индуктивностей), дополнительная проводимость и индуктивность, получаемые при монтаже; для пневматических – нестабильность рабочего давления и т.д.

В процессе работы ПУ может подвергаться воздействию разнообразных влияющих факторов. Вибрации и удары приводят к динамическим погрешностям и влияют на воспроизводимость положений механизмов. Источниками вибраций являются вредные внешние воздействия, а также недостаточная жесткость конструкции, неуравновешенность деталей, вращающихся с большими скоростями, отсутствие амортизаторов.

Изменение температурного режима, а также установившийся температурный режим, отличный от расчетного, являются источ-

никами температурных деформаций деталей, изменения зазоров, натягов и размеров, изменения параметров электрических элементов и т.д.

В ПУ широко применяют унифицированные и покупные элементы. Для разработчика, использующего готовую продукцию, вопрос об источниках погрешностей, как правило, отходит на второй план; при расчетах характеристики и погрешности этих элементов устанавливают по паспортным данным.

2.2. Классификация и характеристика погрешностей, влияющих на качество ПУ

Как указано выше, на качество ПУ влияет большое число разнообразных первичных погрешностей и факторов. Практика показывает, что непосредственное влияние каждой первичной погрешности и фактора на точность ПУ зависит от природы их возникновения, а также от их количественных и качественных характеристик.

По природе возникновения погрешности и факторы могут быть случайными и неслучайными. По результату действия погрешности подразделяют на оказывающие случайное и неслучайное воздействие на качество партии приборов и каждого отдельно взятого прибора.

Случайными по своей природе являются погрешности и факторы, изменяющиеся нерегулярно. Они возникают в результате действия многих, часто не поддающихся учету причин, связанных с оборудованием, качеством материалов деталей, с воздействием окружающей среды и квалификацией рабочего, поэтому происходит рассеяние действительных размеров случайным образом. График рассеяния случайных погрешностей дан на рис. 5а. К таким погрешностям относятся погрешности производственного характера, связанные с изготовлением, установкой и креплением деталей и узлов; отклонения свойств материалов, а также эксплуатационные погрешности, обусловленные действием случайных факторов (из-за вибраций, нестационарных температурных и магнитных полей, сил трения). Та или другая погрешность ограничивается допусками.

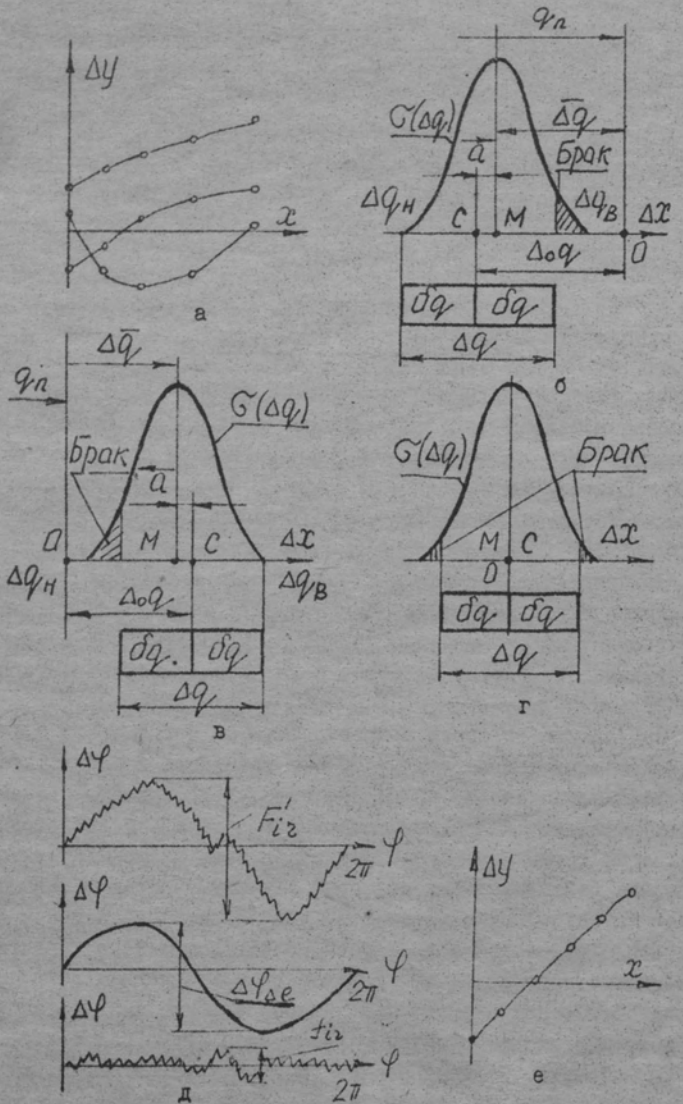

ΔУ
x
а
qп
σ(Δq)
Δq
a
Брак
Δqн
С
М
Δqв
Δx
0
Δ₀q
δq
δq
Δq
б
Δq
qп
σ(Δq)
Брак
a
0
М
С
Δx
Δqн
Δ₀q
Δqв
δq.
δq
Δq
в
σ(Δq)
Брак
М
С
Δx
0
δq
δq
Δq
г
ΔУ
x
е
Δφ
Fiг
2π
φ
Δφ
Δφ₀е
2π
φ
Δφ
fiг
φ
2π
д

Рис. 5

Некоторые случайные погрешности могут иметь систематическую (неслучайную) составляющую. Часто эта систематическая составляющая является следствием активного воздействия на организацию технологического процесса с целью получения желаемых результатов, например желанием избежать неустранимого брака при изготовлении деталей. Для этого действительное поле рассеяния смещают относительно поля допуска на величину α в сторону начала поля допуска. В результате центр группирования M не совпадает с центром поля допуска C. Среднее (неслучайное) значение первичной погрешности, как видно из рис. 5б,в, где показаны схемы расположения полей допусков и действительного рассеяния для деталей типа валов и отверстий, равно

$$\Delta\bar{q} = \Delta_0 q + \alpha . \qquad (9)$$

Значение параметра α выбирают в зависимости от метода обработки. Среднее значение систематической составляющей определяет координата середины поля допуска

$$\Delta_0 q = (\Delta q_н + \Delta q_в)/2 , \qquad (10)$$

где $\Delta q_н$ и $\Delta q_в$ – нижнее и верхнее отклонения поля допуска соответственно. На практике вместо параметра α при расчетах используют относительный коэффициент асимметрии $\alpha_q = \alpha/\delta_q$, где δ_q – половина поля допуска.

Значение коэффициента α_q выбирают по табл. 3 и 4 в зависимости от расположения поля допуска, вида технологического процесса и точности этого процесса. В этом случае среднее значение систематической составляющей

$$\Delta\bar{q} = \Delta_0 q + \alpha_q \delta q = C_q \delta_q , \qquad (11)$$

где C_q – коэффициент асимметрии поля допуска; он выражает соотношение между систематической и случайной составляющими первичной погрешности $C_q = \dfrac{\Delta_0 q}{\delta q} + \alpha_q$.

В тех случаях, когда задан симметричный допуск на параметр детали (например, расстояние между осями отверстий), систематическая составляющая отсутствует ($C_q = 0$) (рис. 5г), смещения полей нет и брак с обеих сторон окончательный.

Таблица 3

Значения коэффициентов a_q и k_q скалярных первичных погрешностей

Расположение поля допуска	Метод обработки	Уровень точности	a_q	k_q
Симметричное	Любой	Экономический	0	I
		Производственный	0	I,I–I,3
		Технический	0	I,3–I,5
Несимметричное	Автоматический	Экономический	0	I
		Производственный	0,0–0,I	I,I–I,2
		Технический	0,I–0,2	I,2–I,3
Несимметричное	Пробными проходами	Экономический	0,I–0,2	I,I–I,2
		Производственный	0,2–0,3	I,2–I,3
		Технический	0,3–0,4	I,3–I,4

Для партии приборов все технологические погрешности носят случайный характер. Для конкретного же устройства эти погрешности оказывают неслучайное влияние на качество, так как для конкретного прибора их знак и значение известны. При повторных циклах функционирования прибора они будут оказывать то же влияние на его качество.

Следует отметить, что некоторые погрешности оказывают случайное влияние (например, трение) как на качество всей партии приборов, так и на качество единичного прибора.

По характеру изменения в процессе работы ПУ погрешности и факторы подразделяются на постоянные (неизменяющиеся), переменные регулярные, переменные нерегулярные и смешанные. Примерами постоянных факторов являются все виды технологических погрешностей (погрешности размеров, валов, линз, перекосы поверхностей) и деформации от постоянных нагрузок.

К переменным регулярным относят погрешности, которые изменяются закономерно (изменение деформации от сил тяжести; температурные деформации), а также теоретические погрешности.

К переменным нерегулярным относят погрешности, изменяющиеся незакономерно (шероховатости поверхностей деталей; эксплуатационные погрешности из-за нестабильности сил трения и других случайных факторов).

К смешанным погрешностям относятся те, которые имеют постоянную или переменную регулярную, или переменную нерегулярную составляющие, например кинематические погрешности зубчатых колес, шага винта (см. рис. 5д) и т.д.

По направлению первичные погрешности и факторы подразделяются на скалярные и векторные. Скалярные погрешности характеризуются только численными значениями. В конкретном ПУ скалярные погрешности имеют вполне определенные значения, знак и направление; во всей партии та же погрешность случайна, поскольку ее размер меняется в пределах допуска от одного экземпляра к другому. Примерами таких погрешностей являются погрешности деталей, изменение размеров при колебании температуры. Векторные погрешности характеризуются численными значениями и направлением. При расчетах модуль и направление векторных погрешностей считают неопределенными и заранее неизвестными, т.е. векторные погрешности всегда случайны. Векторные первичные погрешности являются, как правило, погрешностями нулевых параметров и возникают как при изготовлении деталей, так и при сборке. Например, эксцентриситеты посадочных поверхностей ступенчатых валиков, зубчатых колес, устанавливаемых на валиках, шкал и т.п.

Систематические или неслучайные по своей природе погрешности - это погрешности, неизменяющиеся или изменяющиеся закономерно, параметры их могут быть заранее определены. К ним относят некоторые методические, теоретические и эксплуатационные погрешности, обусловленные действием систематических факторов (температурные деформации от стационарных источников, деформации от известных сил). Отметим, что деформация от известных сил, от изменений температуры относят к систематическим условно, так как они имеют случайные составляющие из-за влияния случайных факторов, но эти случайные составляющие малы. Отметим, что неслучайные по своей природе причины и факторы ока-

зывают закономерное влияние на качество как единичного прибора, так и партии подобных ПУ. Примером таких погрешностей являются теоретические погрешности устройств. Графически систематическая погрешность представлена на рис. 5е.

В заключение следует отметить, что в первичные погрешности не входят отклонения формы поверхности и шероховатость поверхности. Но в ряде случаев для точных ПУ необходимо учитывать и эти погрешности. Поэтому введено понятие действующей погрешности [8, II]. К ним относят все погрешности (в том числе и первичные), влияющие на показатель качества.

Для нахождения значения и направления действующей погрешности следует учитывать, что она направлена по линии действия (по направлению рабочего усилия через точку взаимодействия кинематических пар).

Примером проявления первичных погрешностей являются зазоры. В точных устройствах зазоры регламентируются выбором посадок. При этом зазоры могут иметь различные значения: от наименьшего S_{min} до наибольшего S_{max}. При расчетах полагают, что зазоры носят случайный характер и определяются вероятностными характеристиками рассеяния [II-I3]. Наличие зазоров приводит к смещению направляющих, валиков, зубчатых колес и т.д. В результате возникают погрешности положения рабочих элементов устройства. Для определения погрешностей положения необходимо: I) установить максимальное значение зазора; 2) определить направление сил, действующих на подвижный элемент, направление и величину смещения подвижного элемента; 3) получить расчетную формулу погрешности положения.

На рис. 6в,г показаны виды смещений валиков из-за наличия зазоров в опорах редуктора (рис. 6а,б). Если равнодействующая сила F приложена между опорами, то имеет место параллельное смещение валика, а следовательно, все закрепленные на нем элементы (кулачки, зубчатые колеса, муфты) получат практически одинаковые смещения на величину Δh. Если на валик действует изгибающий момент $M_и$ или консольно приложенная сила F, то имеет место перекос валика. В результате перекоса смещения схемных элементов будут различны: чем ближе к центру поворота C, тем они меньше, а чем дальше от него, тем больше.

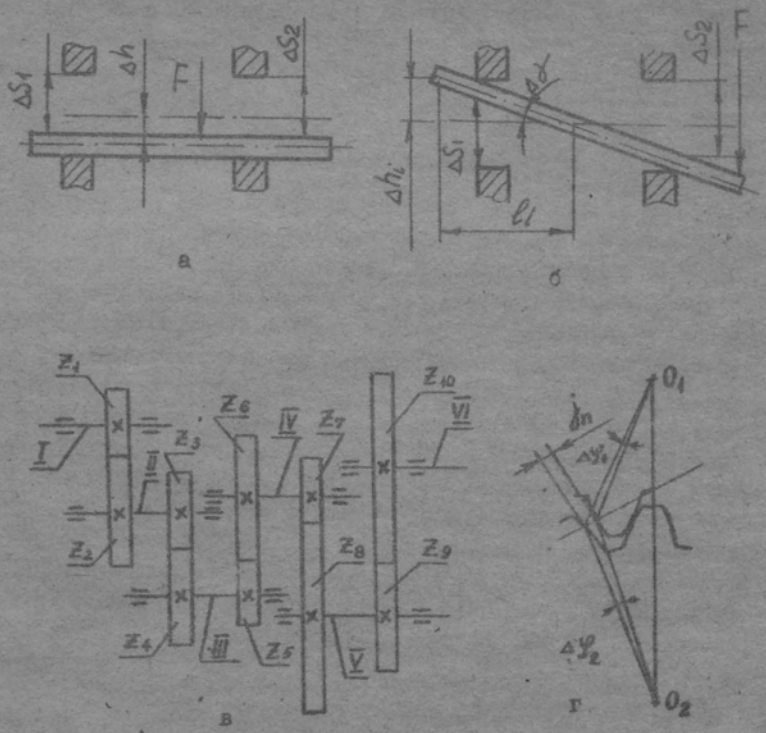


Рис. 6

Смещения элементов, установленных на валике на расстоянии l_i от центра C определяются соотношением

$$\Delta h_i = l_i \Delta \gamma .$$

Угол поворота валика

$$\Delta \gamma = (\Delta S_1 + \Delta S_2)/L ,$$

где ΔS_1 и ΔS_2 – смещения цапф в зазорах опор; L – расстояние между опорами.

Из анализа рис. 6 видно, что вблизи центра поворота следует размещать элементы, требования к точности положения которых наиболее высокие, поскольку смещения элементов вблизи центра поворота минимальны.

Более подробно вопросы учета влияния зазоров на погрешность положения рассмотрены в [7, 9, II, I3].

Схемные теоретические погрешности

Как указано выше, допущения, принимаемые разработчиком преднамеренно или вынужденно при разработке принципиальной схемы ПУ с целью упрощения схемы устройства, замены сложных элементов более простыми или повышения его технико-экономических показателей, приводят к схемным теоретическим погрешностям. Подобные ситуации встречаются при разработке ПУ, работающих на разных принципах: пневматических, электромагнитных, механических и т.д. Например, в широко известном индикаторе часового типа с ценой деления шкалы отсчетного устройства 0,0I мм точность ограничивается реечной передачей. Использование в ортотесте (рис. 7а) вместо реечной передачи синусного механизма позволило создать индикатор с ценой деления 0,00I мм. Поскольку синусный механизм имеет нелинейную характеристику, а в ортотесте применяют равномерную шкалу, то возникает схемная теоретическая погрешность.

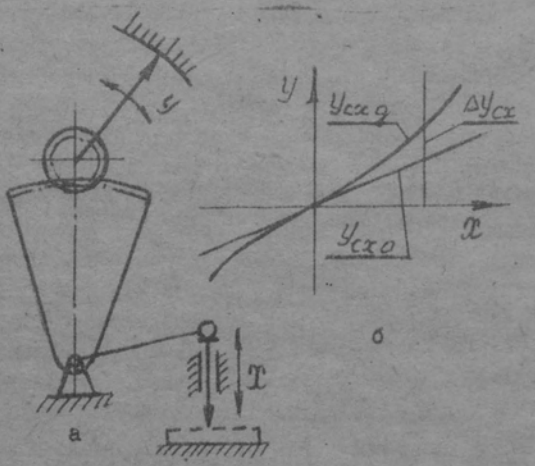


Рис. 7

Схемная теоретическая погрешность присуща многим радиоэлектронным, оптическим и другим приборам. Для расчета подобных устройств обычно исходят из линейности функции преобразования во всем диапазоне изменения входной величины в то время как она является линейной лишь в узких диапазонах преобразуемой величины.

Схемная теоретическая погрешность определяется разностью значений сигналов или перемещений выходного звена при теоретической и действительной схемах

$$\Delta y_{сх} = y_{сх.о} - y_{сх.д}, \qquad (12)$$

где $y_{сх.о}$, $y_{сх.д}$ – значения выходного сигнала (перемещения), соответствующие теоретической (идеальной) и действительной схемам.

Как правило, схемная теоретическая погрешность определяется расчетом, т.е. аналитическим методом. В этом случае необходимо установить точную передаточную функцию механизма, а затем подобрать приближенную, удовлетворяющую задаче линеаризации. Разность между этими зависимостями определит схемную теоретическую погрешность. Достоинством аналитического метода является то, что он позволяет определить погрешность без создания самого ПУ и, следовательно, дает возможность анализировать различные схемы.

Схемная теоретическая погрешность не зависит от качества изготовления ПУ и одинакова для всех ПУ, изготовленных по одной и той же схеме. Погрешность схемы должна быть достаточно малой с тем, чтобы устройство имело заданную точность. На практике принимают, что доля теоретической погрешности не должна превышать 50 % от допустимой погрешности ПУ [9, 12]. Если эта погрешность превышает 50 %, то следует изменить схему прибора или предусмотреть возможность ее уменьшения за счет конструктивно-технологических мероприятий (введение в конструкцию регулировочных устройств, компенсаторов, ограничения рабочих диапазонов и т.п.). Из этих соображений, например, угол поворота рычага в синусных и тангенсных механизмах ПУ обычно ограничивают углом не более 10^0.

Схемные теоретические погрешности относятся к систематическим погрешностям. В случае, когда физические процессы, протекающие в ПУ, не изучены, определение схемной погрешности

осуществляют экспериментально [3, 9, IO, I2].

Пример I. Определить схемную теоретическую погрешность ортотеста (см. рис. 7а).

Для синусного механизма при ведущем измерительном стержне (толкателе) I поворот рычага 2 описывается точной передаточной функцией $y_{сх.о} = \arcsin(x/r)$. Линеаризация этой функции дает приближенную функцию $y_{сх.д} = x/r$. Тогда схемная теоретическая погрешность в соответствии с формулой (I2)

$$\Delta y_{сх} = \arcsin(x/r) - x/r .$$

Учитывая малый угол $y_{о\,сх}$, разложив $\arcsin(x/r)$ в ряд и ограничившись двумя членами ряда, получим

$$\Delta y_{сх} = \frac{x}{r} + \frac{1}{6}\left(\frac{x}{r}\right) - \frac{x}{r} = \frac{1}{6}\left(\frac{x}{r}\right)^3 .$$

Видно, что при одинаковом перемещении измерительного стержня точная и приближенная функции различаются на величину $\frac{1}{6}(x/r)^5$ (см. рис. 7б). Схемная теоретическая погрешность ортотеста

$$y_{сх.орт} = \Delta y_{сх} / i_{45} = \frac{1}{6}\left(\frac{x}{r}\right)^3 \cdot \frac{z_4}{z_5} .$$

2.3. Основные характеристики и законы распределения первичных погрешностей

Каждая первичная погрешность влияет на показатель качества. Степень этого влияния зависит от действительного распределения параметров (размеров) при изготовлении. Если отклонения параметров представляют собой случайные величины, то рассеивание этих параметров характеризуется функцией $y = p(x)$ плотности вероятности этой величины или с помощью основных числовых характеристик.

Характеристикой положения случайной величины является математическое ожидание $M(x) = \int_{-\infty}^{\infty} x\,p(x)dx$, где $p(x)$ - плотность вероятности случайной величины x. Приближенно математическое ожидание случайной величины равно

$$M(x) \approx \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{1}^{n} x_i \,. \qquad (13)$$

Для деталей, обрабатываемых на станке, математическое ожидание может рассматриваться как размер, на который настроен станок.

Характеристикой рассеивания случайной величины около ее математического ожидания является дисперсия D_x или среднее квадратическое отклонение σ_x: $D_x = \int_{-\infty}^{\infty} (x - M_x) p(x) dx$; $\sigma_x = \sqrt{D_x}$.

Преимущество среднего квадратического отклонения перед дисперсией состоит в том, что оно имеет размерность случайной величины.

Указанные числовые характеристики достаточно полно описывают любую случайную величину.

Следует отметить, что при точностном анализе необходимо учитывать два вида рассеяния параметров: рассеяние, определяемое технологическим процессом, и рассеяние параметров в поле допуска (см. рис. 5в,г,д). Последнее определяет фактическое рассеяние параметров деталей, используемых в ПУ.

Как показывают экспериментальные исследования, рассеяние значений случайной величины, получение которой зависит от большого числа независимых факторов, равнозначных по влиянию (т.е. при отсутствии доминирующих факторов), описывается законом нормального распределения (закон Гаусса).

Если при этом центр группирования погрешностей совпадает с серединой поля допуска ($\alpha = 0$), то в пределах $\pm 3\sigma$ находится 99,73 % годных деталей (с размерами, находящимися в поле допуска).

В условиях производства рассеяние параметров может описываться и другими теоретическими законами (Симпсона, равной вероятности и др.), когда на результат изготовления оказывают влияние различные доминирующие факторы, изменяющиеся во времени по различным законам (см. табл. 4). Распределение по каким-либо законам оценивают относительно распределения по закону Гаусса

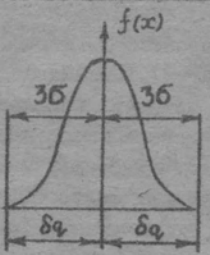
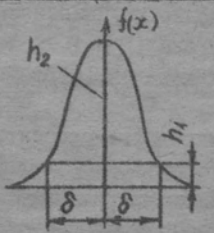
$$\sigma(\Delta q) = k_q \sigma_0(\Delta q), \qquad (14)$$

где $\sigma(\Delta q)$ - среднее квадратическое отклонение действитель-

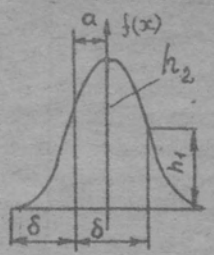
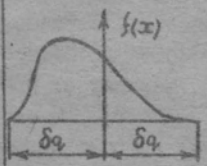
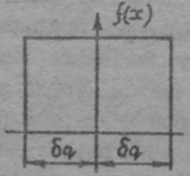
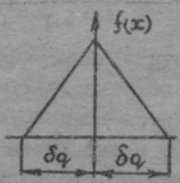
ного распределения; k_q – коэффициент относительного рассеяния (его значения выбирают при расчетах из табл. 3, 4 с учетом ожидаемого реального распределения погрешностей параметров); $\sigma_0(\Delta q)$ – среднее квадратическое распределение по закону Гаусса (при $\alpha = 0$).

Таблица 4

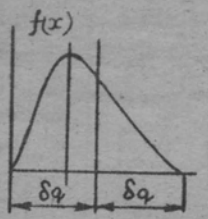
Типовые теоретические распределения технологических погрешностей

Кривые распределения	Характеристика закона распределения	Вид кривой распределения	Параметры кривой распределения		Коэффициенты	
					α_q	k_q
I	2	3	4	5	6	7
I	Закон нормального распределения (кривая Гаусса). Значение $\pm 3\sigma$ совпадает с границами поля допуска		–	–	0	I
2	Закон нормального распределения. Значение $3\sigma > \delta$ при симметричном распределении		A	h_1/h_2		
			I	0,07	0	I,2I
			3	0,I7	0	I,26
			5	0,26	0	I,44

Продолжение табл. 4

I	2	3	4	5	6	7
3	Закон нормального распределения. Значение $3\sigma/\delta$ при одностороннем выходе за границу поля допуска		B 5 I0 25	h_1/h_2 0,26 0,44 0,80	 +0,25 +0,3I +0,40	 I,I7 I,I8 I,20
4	По кривой Максвелла		-	-	-0,28	I,I4
5	Закон равной вероятности		-	-	0	I,73
6	Закон Симпсона		-	-	0	I,22

Окончание табл. 4

I	2	3	4	5	6	7
7	Закон Рэлея		-	-	-0,28	I,I4

Для нормального закона распределения (см. рис. I, табл. 4 коэффициенты $\alpha_q = 0$ и $k_q = 1$.

Если кривая распределения симметрично выходит за обе границы поля допуска (см. рис. 2, табл. 4), то коэффициент $\alpha_q = 0$ а значения коэффициента k_q зависят от процента неисправимого брака.

Если центр группирования сдвинут относительно середины поля допуска и при этом кривая односторонне выходит за пределы поля допуска (см. рис. 3, табл. 4), то значения α_q и k_q зависят от процента исправимого брака. Такое распределение имеет место при работе по методу пробных проходов.

Распределение по закону Максвелла несимметрично (см. рис. 4, табл. 4), оно встречается, когда случайная величина является радиусом-вектором при двумерном рассеянии, т.е. когда эта величина отклоняется по двум перпендикулярным осям в соответствии с нормальным законом распределения. Этим законом описывают биение, ошибки эксцентриситета у зубчатых колес, круговых шкал и т.п.

Закон равной вероятности (закон равномерного распределения) (см. рис. 5, табл. 4) встречается в том случае, когда среди влияющих факторов имеется доминирующий. Распределение погрешностей по этому закону может иметь место при отборе деталей по более узким допускам по сравнению с технологическими допусками, а также из-за дискретности некоторых цифровых приборов и др.

Распределение по закону Симпсона (закон треугольного распределения) (см. рис. 6, табл. 4) имеет место, когда доми-

нирующая величина в процессе изготовления имеет переменный характер. Например, если в первой половине временного интервала она действует замедленно, а во второй - ускоренно, то распределение деталей в партии будет подчиняться этому закону.

Закон Рэлея (см. рис. 7, табл. 4). Это распределение имеет модуль двумерного вектора и используется как характеристика векторных первичных погрешностей существенно положительных величин. Этим распределением описываются отклонения формы и расположения поверхностей, отклонения от соосности, параллельности. В пределах допуска выполняются 95 % изделий.

Для определения параметров векторных первичных погрешностей следует иметь в виду, что векторные первичные погрешности случайны как по модулю, так и по направлению. Коэффициент для учета систематической составляющей, обусловленной векторными погрешностями, определяют по формуле

$$C_p = M(A_{сл})C_q = \frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} A_{сл}C_p\,d\Theta,$$

где $M(A_{сл})$ - математическое ожидание случайной части передаточной функции; Θ - угол, определяющий направление векторной первичной погрешности (если $0 \leqslant \Theta \leqslant 2\pi$).

Значения коэффициента K_p, учитывающего отклонение от нормального закона распределения векторных погрешностей, определяют по формуле $K_p = \sqrt{\sigma^2(A_{сл})(K_q^2 + 9C_q^2) + M^2(A_{сл})K_q^2}$, где $\sigma^2(A_{сл}) = \frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} A_{сл}^2 \cdot d\Theta$. Практика показывает, что появление любого значения угла Θ в пределах $0...2\pi$ равновероятно и его распределение равно $p(\Theta) = \frac{1}{2\pi}$.

3. ЗАВИСИМОСТЬ ПОКАЗАТЕЛЯ КАЧЕСТВА ПУ ОТ ПЕРВИЧНЫХ ПОГРЕШНОСТЕЙ И ПЕРЕДАТОЧНЫХ ФУНКЦИЙ

3.1. Определение функции преобразования сигнала

ПУ может выполнять свою функцию только при том условии, что выходная величина связана с входной устойчивой связью. В статических условиях преобразования, т.е. когда входная величина постоянна, эта зависимость выражается статической характеристикой, представляющей собой зависимость между выходной и входной величинами. Часто под статической характеристикой понимают закон (функцию) преобразования сигнала, движения.

В динамических условиях преобразования, когда входная величина изменяется во времени, зависимость между выходной и входной величинами определяется динамической характеристикой ПУ. Отклонение динамической характеристики от статической зависит от свойств ПУ и скорости изменения входной величины. Во многих случаях зависимость, выражаемая статической характеристикой, остается практически справедливой при возможных скоростях изменения входной величины. Поэтому знание этой характеристики необходимо не только для выполнения кинематических и силовых расчетов, но и для расчетов на точность.

Для определения статической характеристики должны быть известны принципиальная и конструктивная схемы ПУ, схемотехнический состав и статические характеристики схемотехнических элементов. В общем случае статическая характеристика представляется в виде

$$y = f(x, q_i, q_i'), \qquad (15)$$

где x – значение информативного параметра входного сигнала; q_i – значение конструктивного параметра схемотехнического элемента; q_i' – значение влияющего фактора.

В сложных устройствах статическую характеристику находят без учета влияющих факторов во избежание излишней громоздкости получаемой зависимости. Это допустимо по той причине, что действие влияющих факторов обычно проявляется через конструктивные параметры и поэтому анализ их влияния проводят после установления статической характеристики как функции входного сигнала и конструктивных параметров, т.е. $y = f(x, q_i)$.

Статическую характеристику сложного ПУ определяют с учетом характеристик элементарных преобразователей (механизмов) и вида их соединения. При последовательном соединении элементарных преобразователей характеристику ПУ получают путем последовательной подстановки уравнений статических характеристик этих преобразователей, начиная от выхода ПУ до его входа. Если $y_1 = f(x)$, $y_2 = f(y_1), \ldots, y_n = f_n(y_{n-1})$, то

$$y = f_n(y_{n-1}) = f_n\left\{f_{n-1}, \ldots [f_1(x)]\right\}. \qquad (16)$$

При параллельном соединении звеньев с характеристиками $y_1 = f(x), \ldots, y_n = f_n(x)$

$$y = y_1 + y_2 + \ldots + y_n = f(x_1) + \ldots + f_n(x_n). \qquad (17)$$

Определяя статическую характеристику устройства, следует обратить внимание на наличие в ПУ элементов или преобразователей с нелинейной характеристикой. Если окажется, что такие элементы имеются, то необходимо четко установить, с какой целью такой элемент введен в рассматриваемое устройство. Если элемент с нелинейной характеристикой включен с целью упрощения конструкции, то следует использовать его линеаризованную характеристику. Тогда возникает схемная теоретическая погрешность, которая должна быть учтена. Если указанный элемент введен для выполнения нелинейной функции, то используется его точная нелинейная характеристика при определении статической характеристики устройства. В этом случае схемная погрешность отсутствует. Подробнее вопросы определения статической характеристики ПУ рассмотрены в [2, 5, 6, 8, 10, 15].

3.2. Зависимость показателя качества ПУ от первичных погрешностей и факторов

Для установления влияния первичных погрешностей и факторов на интересующий разработчика показатель качества ПУ будем исходить из ранее принятого выражения для суммарной погрешности y_Σ /см. формулу (1)/. Запишем действительную и номинальную функции преобразования сигнала следующим образом:

$$y = f(x, q_i, q'_i), \qquad y_0 = f_0(x_0, q_{i0}, q'_{i0}), \qquad (18)$$

где f и f_0 – действительная и номинальная функции преобразования сигнала; x ; x_0 – действительное и номинальное значения информативного параметра входного сигнала соответственно; q_i и q_{i0} – действительное и номинальное значения конструктивного параметра элементов ПУ; q'_i и q'_{i0} – действительное и номинальное значения влияющих факторов.

Подставив в выражение (I) значения y и y_0 из выражений (I8), разложим действительную функцию в ряд Тейлора. Учитывая малость факторов и погрешностей ($\Delta q_i \ll q_i$; $\Delta x \ll x$ и т.д.), ограничим этот ряд членами, содержащими погрешности и факторы нулевого и первого порядка. После преобразований получим выражение, устанавливающее связь между показателями качества ПУ и первичными погрешностями и факторами,

$$\Delta y_\Sigma = \sum_1^m (\partial y/\partial x)_0 \Delta x + [f(x, q_{i0}, q'_{i0}) - f_0(x, q_{i0}, q'_{i0})] +$$

$$+ \sum_i^n (\partial y/\partial q_i)_0 \Delta q_i + \sum_i^l (\partial y/\partial q'_i)_0 \Delta q'_i , \qquad (19)$$

где $\partial y/\partial x$; $\partial y/\partial q_i$; $\partial y/\partial q'_i$ – передаточные функции (коэффициенты) первичных погрешностей; $\Delta x = x - x_0$ – отклонения информативного параметра входного сигнала от его номинального значения (методическая погрешность, определяющая доприборные погрешности); $f(x, q_{i0}, q'_{i0}) - f_0(x, q_{i0}, q'_{i0})$ – теоретическая (схемная) погрешность ПУ (обозначим ее $\Delta y_{\Delta f}$); $\Delta q'_i = q'_i - q'_{i0}$ – изменение влияющего фактора; n – число первичных погрешностей конструктивных параметров; l – число влияющих факторов.

Поскольку действие влияющих факторов на показатель качества ПУ обычно проявляется через конструктивные параметры, то последний член в выражении можно записать в виде

$$\sum_i^l (\partial y/\partial q'_i)_0 \Delta q'_i = \sum_i^p \left\{ (\partial y/\partial q_i)_0 \sum_j^l (\partial q_i/\partial q_j) \Delta q'_j \right\}. \qquad (20)$$

Выражение (I9) устанавливает зависимость погрешностей ПУ от первичных погрешностей. Из него следует, что существует взаимная независимость действия первичных погрешностей и факторов на показатель качества, что дает возможность исследовать их совместное влияние на погрешность Δy_Σ ПУ по частям; сна-

чала определять погрешности по каждому параметру (фактору), возникающие от соответствующих первичных погрешностей в отдельности, а затем определять общую погрешность ПУ путем суммирования.

Из изложенного выше следует, что каждая первичная погрешность и фактор влияют на тот или иной показатель качества пропорционально $(\partial y/\partial q)\Delta q$. Это влияние будем называть частичным и в дальнейшем будем обозначать Δy с соответствующим индексом (например, формула для частичной погрешности ПУ от конструктивных параметров Δq примет вид $\Delta y_{\Delta q}=(\partial y/\partial q)\Delta q$.

Частная производная $\partial y/\partial q$ характеризует соотношение между причиной и следствием; назовем ее передаточной функцией соответствующей погрешности и обозначим A с соответствующим индексом. На практике встречаются и другие названия частной производной, например коэффициент влияния. Отметим, что передаточная функция A не только показывает степень влияния независимой первичной погрешности на показатель качества ПУ (узла), но и характер этого влияния, поскольку она имеет знак. Например, если передаточная функция A имеет знак "+", то положительная первичная погрешность дает частичную погрешность того же знака, а отрицательная – отрицательную. Передаточная функция определяется при номинальных значениях параметров, т.е. без учета погрешностей.

С учетом принятого обозначения частной производной запишем выражение в следующем виде:

$$\Delta y_{\Sigma}=\sum_{i}^{m}A_{x}\Delta x+\Delta y_{\Delta f}+\sum_{i}^{n}A_{q_i}\Delta q_i+\sum_{i}^{l}A_{q'_i}\Delta q'_i. \qquad (21)$$

3.3. Методы определения передаточных функций первичных погрешностей и факторов

Для определения влияния первичных погрешностей и факторов на те или другие показатели качества ПУ /см. выражения (19) и (21)/ необходимо установить значения и знаки передаточных функций, связывающие соответствующую погрешность с ее частичным влиянием.

Для нахождения передаточных функций в настоящее время используют аналитический, графо-аналитические и эксперименталь-

ный методы. Рассмотрим основные методы на конкретных примерах нахождения передаточных функций некоторых погрешностей ПУ.

Аналитический метод (метод дифференцирования). Этот метод основан на том, что функция преобразования сигнала последовательно дифференцируется по входящим в нее параметрам, имеющим первичные погрешности. Найденные значения $A_q = \partial y / \partial q$ являются передаточной функцией соответствующей первичной погрешности. На рис. 8 приведена схема измерительного устройства. Угол отклонения y связан с конструктивными параметрами устройства и углом поворота винта x зависимостью

$$y = \frac{k p r_2}{2\pi f' r_1} x, \qquad (22)$$

где k и p – число заходов и шаг резьбы винтового механизма I; r_1, r_2 – длины плеч двухплечного рычага 2; f' – фокусное расстояние положительной линзы 3.

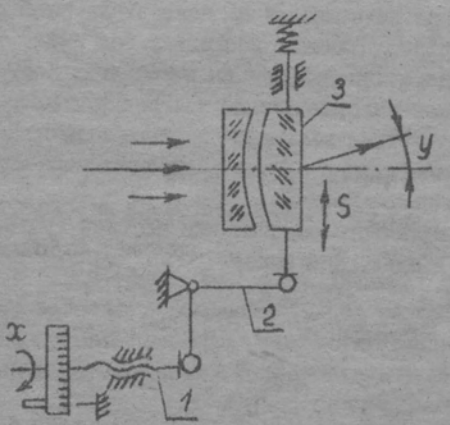


Рис. 8

Основные погрешности функционирования измерительного устройства обусловлены погрешностями фокусного расстояния положительной линзы $\Delta f'$, длин рычагов Δr_1 и Δr_2, шага винта Δp (кроме указанных погрешностей на точность функционирования устройства влияют погрешности опорных поверхностей рычагов, зазоры в опорных узлах; в рассматриваемом примере их

влияние на y не учитывается). Дифференцируя зависимость (22) по параметрам, имеющим первичные погрешности, получим

$$\Delta y_{\Delta f'} = -\frac{r_2 k p x}{2\pi f'^2 r_1}\Delta f' = -\frac{y}{f'}\Delta f',$$

$$\Delta y_{\Delta r_1} = -\frac{k p r_2 x}{2\pi f' r_1^2}\Delta r_1 = -\frac{y}{r_1}\Delta r_1,$$

$$\Delta y_{\Delta p} = \frac{k r_2 x}{2\pi r_1 f_1'}\Delta p = \frac{y}{p}\Delta p,$$

$$\Delta y_{\Delta r_2} = \frac{k p x}{2\pi r_1 f'}\Delta r_2 = \frac{y}{r_2}\Delta r_2 .$$

Метод дифференцирования нашел применение на практике из-за своей простоты. К недостаткам метода следует отнести то обстоятельство, что его нельзя применить для определения передаточных функций нулевых параметров, а также для тех случаев, когда первичные погрешности представляют собой переменные нерегулярные величины или выражение передаточной функции весьма громоздко. Например, соотношение (22) для определения $\Delta y_{\Delta p}$ может быть применено только для вычисления погрешности устройства из-за накопленной погрешности винта и не может быть применено для определения погрешности из-за местной погрешности винта, которая носит нерегулярный характер.

Метод относительных погрешностей. Этот метод является частным случаем аналитического метода. Свое название метод получил благодаря использованию в нем относительных погрешностей деталей электро- и радиоэлементов, оптических и других элементов. Применение этого метода позволяет исследовать влияние погрешностей разных физических величин: давлений, линейных размеров и электрических величин.

Для определения относительных передаточных функций сначала находят ее передаточную функцию дифференцированием по соответствующему параметру, а затем – относительную погрешность, разделив обе части на выражение для передаточной функции ПУ [7].

Геометрический метод. Этот метод основан на геометрическом сопоставлении изображений реального и номинального устройства (узла), отличающихся друг от друга наличием рассматри-

ваемой погрешности. Для нахождения передаточной функции при использовании этого метода предварительно осуществляют графическое построение, выявляющее первичную погрешность, а затем устанавливают аналитическое выражение для передаточной функции.

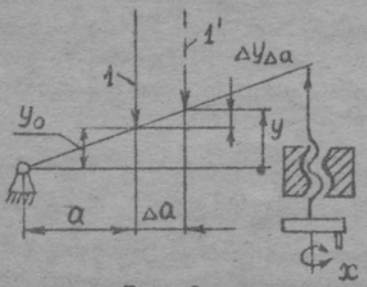


Рис. 9

На рис. 9 показаны два положения тубуса микроскопа, перемещаемого с помощью рычажно-винтового механизма точных перемещений. Идеальное положение тубуса показано сплошной линией I, а реальное, смещенное на $\Delta\alpha$, - штриховой I' (различие в положении обусловлено, например, погрешностью сборки). Из рис. 9 видно, что при фокусировке реального устройства тубус перемещается на величину y вместо y_0. Таким образом, ошибка перемещения $\Delta y_{\Delta\alpha} = y - y_0$. Из подобия треугольников получим $\frac{\Delta y_{\Delta\alpha}}{\Delta\alpha} = \frac{y_0}{a}$. Откуда $\Delta y_{\Delta\alpha} = \frac{y_0}{a}\Delta\alpha$ и, наконец, передаточная функция для ошибки $\Delta\alpha$ $A_{\Delta\alpha} = y/\alpha$.

Геометрический метод позволяет наглядно и просто выявить влияние зазоров на точность работы деталей в соединениях, обеспечивающих вращательное и поступательное движения (см. рис. 6).

Метод преобразования исходной схемы. Этот метод применяют, если рассмотренные выше методы (аналитический и геометрический) не применимы. Например, из-за отсутствия в схеме конструктивных параметров или когда структура устройства определяет его передаточную функцию, равную единице. Суть метода заключается в таком преобразовании исходной схемы устройства, которое позволяет ввести конструктивные параметры в функцию преобразования при сохранении структурной схемы. Для преобразованного устройства оказывается возможным определение передаточных функций методом дифференцирования. После их определения осуществляют переход к исходной схеме. Рассмотрим применение данного метода на конкретном примере.

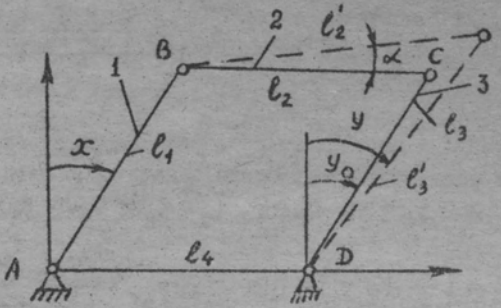


Рис. IO

Определим передаточные функции погрешностей в параллелограммном механизме, используемом в ряде оптических приборов, РЭА. В этом механизме при повороте кривошипа I (рис. IO) на угол x коромысло поворачивается на угол y_0. Передаточное отношение механизма равно единице, так как $y_0 = x$ и $l_1 = l_3$; $l_2 = l_4$. Поскольку размеры всех его звеньев имеют погрешности изготовления: кривошип – Δl_1; шатун – Δl_2; коромысло – Δl_3; стойка – Δl_4, то возникает погрешность положения выходного звена – коромысла 3. Преобразуем параллелограмм в шарнирный четырехзвенник (показан пунктиром) с конструктивными параметрами l_1, l_2', l_3' и l_4. При этом $l_2 \neq l_2'$ и $l_3 \neq l_3'$. Действительное положение выходного звена обозначим y, действительное угловое положение звена 2 относительно его номинального положения – через угол α. Проецируем механизм на ось абсцисс. Тогда получим выражение

$$l_1 \sin x + l_2' \cos\alpha - l_3' \sin y - l_4 = 0,$$

откуда

$$\sin y = (l_1 \sin x + l_2 \cos\alpha - l_4)/l_3'. \qquad (23)$$

Дифференцируя полученное выражение по конструктивным параметрам l_1, l_2', l_3' и l_4, получим для преобразованного механизма

$$\Delta y_{\Delta l_1} = \left(\frac{1}{l_3'}\,\frac{\sin x}{\cos y}\right)\Delta l_1; \qquad \Delta y_{\Delta l_2'} = \left(\frac{1}{l_3'}\,\frac{\cos\alpha}{\cos y}\right)\Delta l_2';$$

$$\Delta y_{\Delta l_3'} = \left(-\frac{1}{l_3'}\,\frac{\sin y}{\cos y}\right)\Delta l_3'; \quad \Delta y_{\Delta l_4} = \left(-\frac{1}{l_3'\cos y}\right)\Delta l_4. \qquad (24)$$

Осуществляя переход от преобразованной схемы к исходной путем получения частного решения задачи из общего (для чего принимаем $x = y_0 = y$, $\alpha = 0$; $l_2 = l_2' = l_4$, $l_1 = l_3' = l_3$), получим

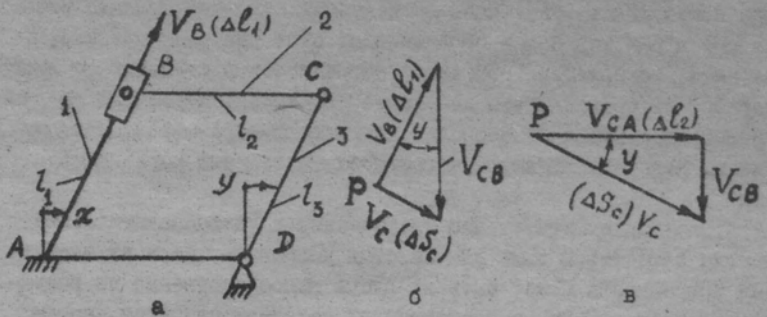
$$\Delta y_{\Delta l_1} = \left(\frac{1}{l_3}\,\mathrm{tg}\,y_0\right)\Delta l_1; \quad \Delta y_{\Delta l_2} = \left(\frac{1}{l_3\cos y_0}\right)\Delta l_2;$$

$$\Delta y_{\Delta l_3} = \left(-\frac{1}{l_3}\,\mathrm{tg}\,y_0\right)\Delta l_3; \quad \Delta y_{\Delta l_4} = \left(-\frac{1}{l_3\cos y_0}\right)\Delta l_4. \qquad (25)$$

Выражения в скобках определяют передаточную функцию соответствующей погрешности.

На основе рассмотренного метода разработан метод преобразованных цепей, который применяется для расчета электрических цепей.

Метод плана малых перемещений. Рассматриваемый метод универсален, однако более сложен, чем геометрический, и используется, как правило, когда применение последнего невозможно. Метод основан на построении планов скоростей и малых перемещений элементов исследуемого механизма. Рассмотрим методику определения передаточных функций на примере параллелограммного механизма (рис. IIа). Пусть требуется найти ошибку положения коромысла 3, если кривошип I изготовлен с погрешностью Δl_1. Для построения плана скоростей фиксируют положения кривошипа, а ошибку его длины принимают переменной, условно она изображена в виде ползуна, перемещающегося вдоль кривошипа. Естественно, что перемещение ползуна будет вызывать такое же перемещение коромысла 3, как и действие первичной погрешности Δl_1. Пусть ползун перемещается со скоростью V_B вдоль кривошипа (тогда шарнир C будет перемещаться по дуге окружности радиусом l_3 со скоростью V_C). Построим план скоростей, позволяющий найти связь между перемещениями шарниров B и C.



а б в

Рис. II

Из полюса P (рис. IIб) откладываем вектор скорости V_B ползуна (шарнира B), параллельный направлению AB, и вектор скорости V_C шарнира C (перпендикулярный к CD). Концы этих векторов замыкает вектор относительной скорости V_{CB} (он перпендикулярен к BC). Из построенного треугольника находим, что $V_C = V_B \operatorname{tg} y$. Затем от плана скоростей переходят к плану малых перемещений. Для этого выбираем малый отрезок времени Δt, в течение которого ползун (шарнир B), двигаясь со скоростью V_B, переместится на расстояние Δl_1. Тогда шарнир C за тот же отрезок времени переместится на расстояние $\Delta S_c = V_c \Delta t = V_B \operatorname{tg} y \Delta t = \operatorname{tg} y \Delta l_1$ и погрешность положения коромысла будет

$$\Delta y_{\Delta l_1} = \frac{\Delta S_c}{l_3} = \left(\frac{\operatorname{tg} y}{l_3}\right)\Delta l_1 \quad . \qquad (26)$$

По указанной методике определяем угловую погрешность положения коромысла из-за погрешности длины шатуна 2. План скоростей и малых перемещений для этого случая дан на рис. IIв. Из плана скоростей после перехода к плану малых перемещений находим

$$\Delta y_{\Delta l_2} = \frac{\Delta S_c}{l_3} = \left(\frac{1}{l_3 \cos y}\right)\Delta l_2 \, . \qquad (27)$$

Метод разложения функции в ряд. Этот метод наиболее часто применяют для нахождения теоретических погрешностей устройств, возникающих вследствие замены точных нелинейных функций преобразования сигнала их приближенными линейными выражениями.

Для получения приближенной зависимости исходную функцию разлагают в ряд Тейлора и ограничивают этот ряд, как правило, членами, содержащими первичные погрешности в степенях не выше первой. На практике это допустимо, поскольку первичные погрешности составляют незначительную долю параметров, поэтому уже их квадраты являются погрешностями второго порядка малости.

Следует отметить, что графические и графоаналитические методы эффективны лишь для простых устройств, если их частичная погрешность может быть выявлена непосредственно из рисунка механизма. Если же элементарный механизм является частью сложного ПУ, то задача определения частичной погрешности в зависимости от первичной погрешности усложняется и обычно выполняется в два этапа. На первом этапе находят промежуточную погрешность положения (частичную погрешность элементарного механизма $\Delta q_{\Delta q}$), а затем соответствующую передаточную функцию передачи первичной погрешности детали (элемента) механизма A_{yx}. В этом случае частичная погрешность от рассматриваемой первичной погрешности рассчитывается по формуле

$$\Delta y_{\Delta q} = A_{yx} \Delta q_{\Delta q} . \qquad (28)$$

Промежуточная погрешность положения вычисляется каким-либо из рассмотренных выше геометрических или графоаналитических методов.

Передаточную функцию A_{yx} определяют дифференцированием функции передачи движения от выходного звена до соответствующего элемента (детали).

Для механизмов с линейной зависимостью между входным и выходным звеньями (элементами, деталями) передаточная функция определяется как простое отношение линейных перемещений, углов поворота или скоростей соответствующих ведомых и ведущих звеньев.

Экспериментальный метод. Он применяется, когда при расчете цепи (функционального узла) достаточно знать численное значение передаточной функции. Этот метод менее сложен и трудоемок, чем аналитический.

Поскольку суммирование всех видов частичных погрешностей происходит алгебраически, т.е. в соответствии с принципами

наложения, то можно экспериментально найти каждую из них. Если собрать ПУ (радиоэлектронную схему) с номинальными значениями параметров и дать отклонение одному из них, например Δq_i, то частичная погрешность $\Delta y_{\Delta q_i}$ будет характеризоваться именно этим параметром, поскольку для других параметров и факторов отклонения равны нулю ($\Delta x = 0$; $\Delta q_i' = 0$ и т.д.). Тогда

$$\Delta y_{\Delta q_i} = A_i \Delta q_i , \qquad (29)$$

откуда

$$A_i = \Delta y_{\Delta q_i} / \Delta q_i . \qquad (30)$$

На практике для определения A_i используют реальное функциональное устройство (радиоэлектронную схему), принимая его за идеальное, а его параметры – за номинальные. Это приводит к методической погрешности ΔA_i, но она незначительна.

3.4. Определение суммарной погрешности ПУ

Одной из задач расчета на точность является определение значений выходных параметров ПУ. Вследствие погрешности устройства

$$y = y_0 \pm \Delta y_\Sigma . \qquad (31)$$

По суммарной погрешности Δy_Σ судят о разбросе выходных параметров, о правильности выбора схемотехнических элементов и конструктивно-технологических решений.

Исходным для расчета суммарной погрешности является соотношение (19), связывающее первичные погрешности, параметры прибора и условия эксплуатации. Определение суммарной погрешности (суммирование частичных погрешностей) проводят для тех состояний ПУ, когда Δy_Σ принимает максимальные значения независимо от знака. Поскольку все первичные погрешности делятся на случайные и систематические, суммарная погрешность может быть представлена в виде

$$\Delta y_\Sigma = \Delta y_c + \Delta y_{сл} , \qquad (32)$$

где Δy_c – систематическая составляющая суммарной погрешности; $\Delta y_{сл}$ – случайная составляющая суммарной погрешности.

Суммирование систематических (неслучайных) погрешностей происходит в полном соответствии с принципом наложения, поскольку частичные неслучайные погрешности могут быть вычислены однозначно на этапе проектирования.

Схемная теоретическая погрешность устройства определяется как

$$\Delta y_{T\Sigma} = \sum^{n_T} \Delta y_T , \qquad (33)$$

где Δy_T – частичная теоретическая погрешность; n_T – число теоретических погрешностей.

Систематическая погрешность устройства от действия эксплуатационных факторов имеет вид

$$\Delta y_{э\Sigma} = \sum^{n_э} \Delta y_э , \qquad (34)$$

где $\Delta y_э$ – частичная погрешность от действия эксплуатационного фактора (изменение температуры, силовая деформация и пр.); $n_э$ – количество эксплуатационных факторов.

Случайная составляющая суммарной погрешности представляет собой сумму частичных погрешностей, определяемую всеми случайными конструктивно-технологическими и эксплуатационными факторами. Рассчитать однозначно случайные частичные погрешности нельзя, их можно только определить экспериментально у изготовленного устройства. В этом случае они могут рассматриваться как неслучайные.

На этапе проектирования, когда в распоряжении разработчика нет готового образца, для определения случайной части суммарной погрешности используют вероятностные расчеты, если законы распределения погрешностей известны. Расчеты при этом основываются на некоторых допущениях:

1. Расчеты относятся к серии однотипных ПУ, а не к отдельному устройству. Однако результаты расчетов распространяют и на отдельный образец устройства, исходя из единообразия технологических процессов для любого изделия, изготовляемого серийно.

2. Значения отдельных первичных случайных погрешностей принимают равными их максимальным значениям.

3. Случайные погрешности с отклонениями порядка 10 % счи-

таются неслучайными. При расчетах их значения принимают равными предельным значениям.

4. Определение $\Delta y_{сл}$ проводят для наихудшего случая, т.е. для случая, когда она принимает максимальное значение.

С учетом этих допущений запишем выражение для случайной части погрешности ПУ в виде

$$\Delta y_{сл} = \sum_{i}^{n_1} A_{ci} C_{pi} \delta q_i + \sqrt{\sum_{i}^{n_1} A_{ci}^2 K_{pi}^2 \delta q_i^2 + \sum_{i}^{n_2} A_{ci}^2 K_{pi}^2 \delta q_i^2} , \quad (35)$$

где n_1 ; n_2 – число частичных погрешностей, вызванных случайными погрешностями и факторами, которые имеют и не имеют систематические составляющие; A_c – передаточная функция погрешности; δq – половина вероятного поля рассеяния случайной первичной погрешности или фактора; C_p , K_p – коэффициенты, зависящие от расположения поля и вида рассеяния первичной погрешности и фактора (определяют по табл. 4). Для скалярных погрешностей $C_p = C_q$, $K_p = K_q$.

Если учесть, что систематическая частичная погрешность может быть представлена в виде $\Delta y_c = A_c \Delta q$, то выражение для суммарной погрешности (33) с учетом (34) примет вид

$$\Delta y_{\Sigma} = \sum_{i}^{n_c} A_{ci} \Delta q_i + \sum_{i}^{n_1} A_{ci} C_{pi} \delta q_i +$$

$$+ \sqrt{\sum_{i}^{n_1} A_{ci}^2 K_{pi}^2 \delta q_i^2 + \sum_{i}^{n_2} A_{ci}^2 K_{pi}^2 \delta q_i^2} , \quad (36)$$

где n_c – число частичных погрешностей, обусловленных систематическими погрешностями и факторами.

Конкретный состав систематической и случайной частей суммарной погрешности зависит от схемы и конструкции устройства и условий эксплуатации.

4. МЕТОДЫ РАСЧЕТА ПУ НА ТОЧНОСТЬ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ

4.I. Виды расчетов на точность при проектировании

Проектирование ПУ связано с методами точностного синтеза и анализа, называемыми в теории точности также прямой и обратной задачами точности. Прямая задача точности заключается в выборе оптимальных параметров и их характеристик на основе заданной погрешности ПУ. Это так называемый проектный расчет. Обратная задача точности заключается в расчете суммарной погрешности прибора по заранее заданным параметрам и характеристикам элементов, входящих в состав ПУ. Это проверочный расчет.

Каждая из указанных задач точности имеет свою специфику и свои методы решения. Однако для любых видов расчета на точность исходными данными являются заданный допуск на точность ПУ, структурная и кинематическая схемы, конструкция устройства и возможности технологического процесса. Главной задачей точностного расчета является обеспечение заданной точности, т.е. выполнение условия (2).

Каждому этапу проектирования ПУ соответствуют определенные виды и методы точностных расчетов. Методы точностного расчета базируются на основе предельных отклонений погрешностей или на основе вероятностных характеристик рассеяния. Выбор конкретного метода определяется с учетом требований к выходным параметрам ПУ, конструкции, возможностей производства и экономических факторов. По мере разработки конструкции задачи точностного расчета меняются. Если на начальных этапах точностные расчеты носят укрупненный (прикидочный) характер, то уже на последующих этапах они носят более детальный характер.

Так, на этапах разработки технического задания и технического предложения разработчик выполняет ряд точностных расчетов, позволяющих установить обоснованные требования к отдельным функциональным устройствам и их элементам, а следовательно, более точно разработать принципиальную схему устройства и осуществить выбор схемотехнических элементов и конструктивного оформления функционального узла. На этапах технического и рабочего проектов выполняют полный анализ технологичности конструкции и устанавливают необходимую точность изго-

товления деталей (и элементов), сборки функциональных узлов (каскадов) и приборного устройства в целом.

Далее подробно рассмотрим методики проектного и проверочного расчетов на точность приборных устройств. Целью этих расчетов является оптимизация распределения суммарного допуска между всеми элементами ПУ из условий обеспечения заданной точности функционирования устройства при приемлемой сложности изготовления. Исходные формулы, используемые при обоих видах расчета, приведены выше. К моменту выполнения этих расчетов конструктивный и схемотехнический составы устройства полностью определены, известны номинальные значения параметров элементов, входящих в ПУ, и требования к точности функционирования самого ПУ.

4.2. Определение допуска на приборную погрешность

Обычно в ТЗ задается допуск на точность функционирования всего устройства. Этот допуск включает в себя, в общем случае, приборную, методические и другие погрешности. Однако разработчика ПУ интересует в основном только приборная (инструментальная) погрешность, т.е. доля допуска на ПУ, выделяемая непосредственно на устройство и качество его изготовления.

Задача установления допустимой приборной погрешности достаточно сложная. Трудность ее решения зависит от назначения, типа и схемотехнического состава устройства, условий эксплуатации и вида возможных погрешностей.

Если принять, что все составляющие суммарной погрешности носят случайный характер, то можно записать

$$[\delta_0 S] = \frac{1}{K_ц}\sqrt{K_м^2 \delta y_м^2 + K_п^2 \delta y_п^2 + K_р^2 \delta y_р^2}\,, \qquad (37)$$

где $[\delta_0 S]$ – допуск на точность функционирования устройства; $\delta y_м$, $\delta y_п$ и $\delta y_р$ – допуски на методическую и приборную погрешности и погрешность регистрации соответственно; $K_ц$, $K_р$, $K_м$, $K_п$ – коэффициенты, характеризующие относительное рассеяние погрешностей цепи, регистрации, а также методической и приборной погрешностей.

Тогда получим выражение для приборной погрешности

$$\delta y_{п} = \frac{1}{K_{п}} \sqrt{K_{ц}^2 [\delta_0 S]^2 - K_{м}^2 \delta y_{м}^2 - K_{р}^2 \delta y_{р}^2} \,. \qquad (38)$$

Очевидно, что для определения допуска на приборную погрешность необходимо иметь сведения о методических погрешностях и погрешностях регистрации. На практике величины $\delta y_{м}$ и $\delta y_{р}$ обычно устанавливают путем предварительного расчета или из опыта, поскольку уже на начальных этапах проектирования указанные погрешности могут быть выявлены и проанализированы более или менее полно. Отметим, что поскольку суммирование погрешностей осуществляется по квадратичному закону, то нет необходимости выяснять все составляющие методической погрешности и погрешности регистрации, достаточно выявить лишь доминирующие погрешности.

Методические погрешности редко оказывают заметное влияние на работу точных ПУ, поэтому при проектировании чаще всего их не учитывают [8, 9].

Погрешность регистрации зависит от того, каким образом снимается выходной сигнал. Для ПУ погрешность регистрации – это погрешность ввода входной величины или погрешность определения снимаемого отсчета. Погрешность регистрации (считывания) определяется соотношением

$$\delta y_{р} = 0{,}5\, m\, \Delta y_{ц} \,, \qquad (39)$$

где $\Delta y_{ц}$ – цена деления отсчетной шкалы; m – коэффициент, зависящий от метода снятия отсчета; если оценка производится без учета долей делений, то $m = 1$, в противном случае m принимает значение, равное оцениваемой доле.

Если расчет методических погрешностей и погрешностей регистрации затруднен или на данном этапе нежелателен, а также в случае отсутствия опыта по определению этих погрешностей для аналогичных устройств, то принимают, что доля каждой из погрешностей составляет (0,2...0,3) $[\delta_0 S]$ (погрешности менее 0,2 $[\delta_0 S]$ не оказывают заметного влияния на приборную погрешность $\delta y_{п}$), а затем по формуле (38) определяют приборную погрешность. При необходимости уточняют правильность назначения допусков на методическую погрешность и погрешность регистрации.

Установленная приборная погрешность является исходной

для определения параметров точности функциональных узлов и элементов. Отметим, что во всех случаях желательно, чтобы доля приборной погрешности была возможно большей. Если окажется, что величина $\delta y_п$ мала, то следует провести дополнительный анализ с целью уменьшения доли других составляющих, а в случае невозможности следует изменить схему ПУ.

4.3. Способы распределения допуска на приборную погрешность устройства между ФУ и элементами

Как правило, ПУ представляет собой сложную систему, состоящую из большого количества устройств и элементов, которые часто выполняют в виде функционально законченных узлов. Проектирование конструкции ПУ ведется по отдельным конструктивно-эксплуатационным блокам. Для точностного расчета этих блоков необходимо "разделить" допуск на функциональные узлы, исходя из допуска на приборную погрешность ПУ. Приборная часть допуска на ПУ выражается в общем случае соотношением (32). Поскольку неслучайная составляющая может быть рассчитана однозначно, то допуск на случайную составляющую

$$\delta y_{сл} = \delta y_п - \delta y_с . \qquad (40)$$

Найденное значение $\delta y_{сл}$ распределяют между функциональными узлами и элементами ПУ.

Эта задача может быть решена несколькими способами. Первый способ распределения этого допуска между функциональными узлами основан на предположении, что все входящие в ПУ функциональные узлы влияют на показатель качества (фактически на суммарный допуск) случайно и одинаково, т.е. допуски на случайные составляющие отдельных функциональных узлов равны (в дальнейшем просто погрешность ФУ) $\delta_1 = \delta_2 = \ldots = \delta_n$. В этом случае

$$\delta y_{сл} = \sqrt{\sum_{i}^{n} \delta_i^2} = \delta_i \sqrt{n}, \qquad (41)$$

где n – число функциональных узлов, входящих в ПУ.

Тогда допуск на случайную составляющую ФУ равен

$$\delta_1 = \delta_2 = \ldots = \delta_n = \delta y_{сл} / \sqrt{n} . \qquad (42)$$

При таком подходе к распределению допуска между элементами и ФУ не учитывается различие в их сложности и структуре. Поэтому на некоторые узлы значения δ_i могут быть очень жесткими.

Второй способ распределения основан на учете вклада погрешностей каждого функционального узла в общую погрешность ПУ. При условии случайного влияния погрешностей ФУ общая погрешность определяется соотношением

$$\delta y_{сл} = \sqrt{\sum_{i}^{n} A_i^2 \delta_i^2} \quad . \tag{43}$$

Полагая, что погрешности функциональных узлов одинаковы, т.е. $\delta_1 = \delta_2 = \ldots = \delta_n$, запишем (36) в виде

$$\delta y_{сл} = \delta_i \sqrt{\sum_{i}^{n} A_i^2} \quad , \tag{44}$$

откуда

$$\delta_1 = \delta_2 = \ldots = \delta_n = \delta y_{сл} / \sqrt{\sum_{i}^{n} A_i^2} \quad . \tag{45}$$

Определение допуска на ФУ по рассмотренному методу обладает тем же недостатком, что присущ методу равного вклада погрешностей ФУ, хотя значения допуска на ФУ получаются более точные.

Третий способ основан на предположении, что вклад каждой частичной погрешности ФУ в суммарную погрешность одинаков, т.е. $\delta_1 A_1 = \delta_2 A_2 = \ldots = \delta_n A_n$. Учитывая это обстоятельство, выражение для суммарной погрешности запишем в виде

$$\delta y_{сл} = \delta_i A_i \sqrt{n} \quad . \tag{46}$$

Откуда частичная погрешность отдельного ФУ равна

$$\delta_1 A_1 = \delta_2 A_2 = \ldots = \delta_n A_n = \delta y_{сл} / \sqrt{n} \quad , \tag{47}$$

тогда устанавливаем допуск на функциональное устройство

$$\delta_1 = \delta y_{сл} / (A_1 \sqrt{n}); \ldots ; \delta_n = \delta y_{сл} / (A_n \sqrt{n}) . \tag{48}$$

Из соотношения (48) видно, что допуски на ФУ получаются разными. Их значения зависят от передаточной функции соответ-

стящего узла. Распределение суммарного допуска по данному способу позволяет выявить ФУ, на изготовление которых требуются жесткие и нежесткие допуски. Благодаря этому разработчик может своевременно заметить ФУ, на проектирование которых ему следует обратить особое внимание, и принять необходимые конструктивные и технологические меры, обеспечивающие возможность изготовления ФУ с жесткими допусками.

Четвертый способ распределения суммарного допуска между ФУ основан на учете затрат, связанных с выполнением допусков. Этот способ основывается, главным образом, на учете затрат на изготовление деталей. Затраты на сборку не учитывают совсем или учитывают, полагая, что затраты на нее обратно пропорциональны погрешностям. Как видно из рис. I2, где предоставлены зависимости затрат на изготовление деталей (кривая I) и сборку (кривая 2), затраты на сборку возрастают с расширением допусков на изготовление деталей. Поэтому бытующее мнение о необходимости добиваться максимально возможных допусков на изготовление деталей для точных устройств неверно. Кривая 3 характеризует суммарные затраты на изготовление и сборку. При этом существует некоторая зона A для допусков на изготовление деталей, при которых суммарные затраты минимальны. Это следует иметь в виду при назначении допусков, выборе оборудования и проектировании ФУ.

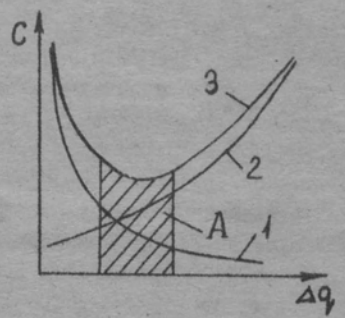


Рис. I2

При распределении суммарного допуска между ФУ с учетом затрат допуск на ФУ может быть определен по формуле

$$\delta_i = \delta_{y_{сп}} \Big/ \sqrt{A_i \sum_i^n A_i} \,. \qquad (49)$$

Существуют и другие способы распределения суммарного допуска между ФУ. Однако на практике наибольшее распространение получили распределения допусков по третьему и четвертому способам. Выбор же конкретного способа зависит от опыта разработ-

чика, вида устройства и условий производства.

Найденное значение допуска на ФУ является исходным для определения параметров точности элементов, образующих ПУ или ФУ.

5. ПРОЕКТНЫЙ РАСЧЕТ ПУ НА ТОЧНОСТЬ

5.1. Основные задачи и положения проектного расчета

Проектный расчет является основным видом расчета на точность. Его задачи различны на каждом этапе проектирования. На этапе эскизного проектирования оценивают степень влияния на точность устройства отдельных частных погрешностей с целью рационального назначения их допустимых величин и выбора наиболее подходящих схемотехнических элементов и их параметров для проектируемой конструкции с учетом обеспечения требований технологичности, экономических факторов и технического задания. При этом используют сравнительно простые критерии для определения точностных параметров элементов ФУ. В качестве одного из возможных критериев точности можно рассматривать так называемый приведенный допуск, который получают из условия, что весь допуск на ПУ (ФУ) расходуется на рассматриваемый функциональный элемент или параметр детали. Приведенный допуск $\delta q_{пр}$ рассчитывают по формуле [10, 13]:

$$\delta q_{пр} = [\delta_0 S]/A_{yx}, \qquad (50)$$

где $[\delta_0 S]$ – допуск на ФУ; A_{yx} – передаточная функция цепи выходное звено ФУ – выход рассматриваемого элемента.

По найденному значению $\delta q_{пр}$ определяют ориентировочный действительный допуск

$$\delta q_р = K \delta q_{пр}, \qquad (51)$$

где K – коэффициент запаса, $K = 0{,}5...0{,}4$ для $n = 3$, $K = 0{,}33...0{,}35$ для $n = 8...12$ (n – число элементов, входящих в рассматриваемую цепь).

По найденным расчетным допускам оценивают приемлемость соответствующих конструктивных и технологических решений и принимают необходимое заключение по оптимизации конструкции.

На этапах технического и рабочего проектов проводят полный точностной анализ устройства и непосредственный расчет допусков на первичные погрешности по заданному допуску на суммарную погрешность устройства, цепи и ФУ. Найденные расчетным путем допуски на первичные погрешности должны быть заменены допусками соответствующих стандартов.

Уравнение (35) является исходным для расчета первичных погрешностей при проектном расчете. Из этого уравнения следует, что задача определения первичных погрешностей по заданному допуску на ПУ (ФУ) имеет множество решений, поскольку в соотношении имеется много неизвестных при одном исходном уравнении; ее решение возможно лишь при некоторых допущениях. Рассмотрим методику проектного расчета [10, 13]. Она базируется на основе безразмерных коэффициентов влияния, с помощью которых устанавливают непосредственную связь между значениями соответствующих частичных погрешностей Δy_i и заданным допуском на точность $[\delta_0 S]$

$$\lambda_i = [\delta_0 S]/\Delta y_i . \qquad (52)$$

Причем, чем больше коэффициент λ_i, тем меньше влияние данной погрешности. Коэффициенты влияния частичных погрешностей определяют по формулам:
для группы систематических погрешностей (n_c)

$$\lambda_c = [\delta_0 S] /(A_q' \cdot \Delta q); \qquad (53)$$

для группы погрешностей n_1, имеющих систематические составляющие,

$$\lambda_1 = [\delta_0 S] / [A_c (C_p + K_p) \delta q] ; \qquad (54)$$

для группы погрешностей, не имеющих систематических составляющих,

$$\lambda_2 = [\delta_0 S]/(A_c K_p \delta q). \qquad (55)$$

С учетом выражений (35), (36) и (53)–(55) при условии равного влияния частичных погрешностей (т.е. при $\lambda = \lambda_c = \lambda_1 = \lambda_2$) после некоторых преобразований найдем

$$\lambda_0 \approx n_c + 0{,}5 n_1 + \sqrt{0{,}25 n_1 + n_2} , \qquad (56)$$

где λ_0 – усредненный (наименьшее допустимое значение) коэффициент влияния.

Коэффициент λ_0 зависит от числа погрешностей и их качественных характеристик. Если при определении $[\delta_0 S]$ систематическая погрешность учтена, то в соотношении (56) следует принять $n_c = 0$.

Среднее значение расчетного допуска на первичные и теоретические погрешности для групп n_c, n_1 и n_2 определяют по формулам

$$\Delta q_{c\,cp} = [\delta_0 S] / A_q \lambda_0, \qquad (57)$$

$$\delta q_{1\,cp} = [\delta_0 S] / [A_c (c_p + K_p) \lambda_0], \qquad (58)$$

$$\delta q_{2\,cp} = [\delta_0 S] / A_c K_p \lambda_0. \qquad (59)$$

По найденным значениям допусков устанавливают необходимые уровни точности и соответствующие им стандартные значения допусков (ближайшие меньшие, с тем чтобы иметь некоторый запас точности для возможного расширения в дальнейшем жестких допусков). Уровни точности выбирают из следующих предельных значений:

$$\begin{aligned}
&\delta q_э \leqslant \delta q_{cp} && \text{– экономический уровень;}\\
&\delta q_п \leqslant \delta q_{cp} < \delta q_э && \text{– производственный уровень;}\\
&\delta q_т \leqslant \delta q_{cp} < \delta q_п^* && \text{– технический уровень;}\\
&\delta q_{cp} < \delta q_т && \text{– допуск не может быть выполнен.}
\end{aligned} \qquad (60)$$

Значения $\delta q_э$; $\delta q_п$ и $\delta q_т$ устанавливают с учетом рекомендаций табл. I и ЕСДП.

Если среди допусков на отдельные погрешности есть такие, для которых $\delta q_{cp} < \delta q_т$, то это означает, что данный допуск – не выполнимый. В этом случае необходимо рассмотреть возможность расширения этого допуска с помощью некоторого перераспределения допусков за счет ужесточения допусков на отдельные элементы, допуски которых могут легко реализованы и проконтролированы. Если же не удается добиться приемлемого

допуска, то необходимо предусмотреть введение в соответствующее ФУ регулировочного устройства или компенсатора, а возможно и пересмотреть схему ФУ.

Необходимо отметить, что рассмотренная методика определения допусков на первичные погрешности и факторы из условия равного влияния частичных погрешностей приводит к некоторому ужесточению допусков на отдельные первичные погрешности за счет усреднения допусков на слабо влияющие погрешности, что не всегда оправдано.

Как видно из выражений (57)-(59), значения первичных погрешностей и факторов зависят от допустимого значения допуска на погрешность ПУ (ФУ), передаточной функции $A_{q(c)}$ и усредненного коэффициента влияния λ_0. Поэтому на практике возможно некоторое увеличение допустимых погрешностей за счет уточнения значений допустимой приборной погрешности ПУ $\delta y_п$ /в формуле обозначена $[\delta_0 S]$ / и усредненного коэффициента влияния λ_0.

Можно предположить, что в результате дополнительного анализа методических погрешностей и погрешностей регистрации не удастся значительно увеличить $\delta y_п$. Что касается λ_0, то здесь имеются определенные возможности, поскольку этот коэффициент, как видно из выражения (56), зависит как от общего числа погрешностей, так и от их качественного состава. Уточнение λ_0 связано с выявлением погрешностей, которые оказывают ничтожное влияние на показатель качества и по этой причине могут быть исключены из расчета. К ничтожным погрешностям предварительно можно отнести погрешности второго порядка малости (например, погрешности микропрофиля от контактных деформаций), а также те, которые меньше других по крайней мере в 10 раз для систематических погрешностей и в 5 раз – для случайных. После выявления ничтожно малых погрешностей рассчитывают уточненное значение λ_0' по формуле:

$$\lambda_0' \approx n_c - n_{cн} + 0{,}5(n_1 - n_{1н}) + \sqrt{0{,}25(n_1 - n_{1н}) + (n_2 - n_{2н})}, \quad (61)$$

где $n_{cн}, n_{1н}, n_{2н}$ – число ничтожно малых частичных погрешностей групп n_c, n_1, n_2 соответственно.

Значение λ_0' подставляют в выражения (57)-(59) и вычисляют расширенные допуски на первичные погрешности и факторы.

Если среди допусков на первичные погрешности и факторы есть невыполнимые, то следует ввести в конструкцию компенсаторы или регулировочные устройства, затем определить необходимое число компенсаторов (учитывая, что в принципе с помощью компенсатора можно компенсировать не только одну, но и несколько погрешностей) и число компенсируемых погрешностей. Новое значение λ_0'' находят по формуле (61) с учетом того, что погрешности, устраняемые с помощью компенсаторов, переходят в группу ничтожно малых. После этого снова определяют допустимые значения первичных погрешностей и факторов по формулам (57)-(59), полагая, что $\lambda_0 = \lambda_0''$. Затем определяют стандартные допуски по методике, изложенной выше, и выполняют проверочный расчет.

Если первичные погрешности элементов устройства однотипны по своей природе (относятся к одной группе), то распределение суммарного допуска между отдельными элементами можно осуществить, как показано выше для ФУ. Пусть первичные погрешности скалярные, тогда формула для суммарного допуска примет вид

$$\delta_0 S = \frac{1}{K_s}\sqrt{\sum_i^n A_{iyx}^2 K_q^2 \delta q_i^2}\,, \qquad (62)$$

где $\delta_0 S$ – половина допуска на суммарную погрешность (заданная величина); δq_i – половина допуска на функциональный элемент цепи; K_s и K_q – коэффициенты относительного рассеяния всей цепи и ее элементов соответственно; A_{iyx} – передаточная функция, связывающая выходные цепи с выходом соответствующего элемента.

Для отыскания первичных погрешностей наиболее часто применяют два способа, аналогичные второму и третьему способам определения исходного допуска для ФУ. Первый способ предполагает равенство допусков функциональных элементов, а второй – равенство частичных влияний. Первый способ обладает тем же недостатком, что и рассмотренный выше второй способ – при его применении возможно завышение требований к одним и занижение к другим элементам. Второй способ более эффективен. Полагая, что все частичные погрешности вносят одинаковый вклад, запишем

$$\delta_0 S = \frac{1}{K_s} A_{yx} K_q \delta q \sqrt{n}\,.$$

тогда допуски на отдельные составляющие

$$\delta q_1 = \left(\frac{K_s \delta_0 S}{A_{yx} K_q \sqrt{n}} \right)_1 ; \qquad \delta q_2 = \left(\frac{K_s \delta_0 S}{A_{yx} K_q \sqrt{n}} \right)_2 ; \ldots .$$

По найденным расчетным значениям допусков определяют их стандартные значения и выполняют все остальные указанные выше операции.

5.2. Порядок выполнения проектного расчета ПУ на точность

При выполнении проектного расчета ПУ можно рекомендовать следующий порядок расчета.

1-й этап. Определение допусков на выходные параметры ПУ в соответствии с ТЗ на проектирование устройства.

2-й этап. Изучение конструкции ПУ. На этом этапе уясняют назначение и условия работы ПУ, его схемотехнический состав и функции, выполняемые ПУ и его ФУ и элементами, порядок взаимодействия между его составными частями. Намечают рациональные границы точностных цепей и отдельных участков. Для ПУ, состоящих из оптических, механических и других схемных элементов, границы точностных цепей (участков), как правило, определяются соответствующими структурными элементами (оптическими, электрическими и др.).

Для выявления связей между элементами и ФУ составляют (используют) структурную, принципиальную, кинематическую и другие схемы с целью получения полного представления о всех преобразованиях, осуществляемых в ПУ с входной величиной.

3-й этап. Вычисление допуска на приборную погрешность. Предварительно устанавливают допуски на методическую погрешность и погрешность считывания (см. разд. 4.2).

4-й этап. Определение допусков на выходные параметры точностной цепи (узел, каскад), исходя из допуска на приборную погрешность ПУ. Эта задача решается одним из возможных способов, указанных в 4.3, с учетом назначения, сложности ПУ и возможностей производства.

5-й этап. Выявление и исследование источников погрешностей. Для каждой точностной цепи (участка) уточняют назначение входящих в нее элементов (деталей), узлов (каскадов), выявляют все возможные источники погрешностей, количественные и качест-

венные характеристики погрешностей и их распределение по группам n_c, n_1 и n_2.

Следует отметить, что при наличии в ПУ элементов с нелинейными законами необходимо уточнить, с какой целью этот элемент введен в данное устройство. Если элемент используется с целью упрощения конструкции (например, для получения линейных шкал), то характеристика этого элемента заменяется линейной. В результате чего возникает схемная теоретическая погрешность, которая должна быть учтена при выполнении точностного расчета. Если выяснится, что указанный элемент введен для воспроизведения нелинейной функции, то линеаризация не требуется, и характеристика цепи составляется с учетом нелинейности характеристики элемента. В этом случае теоретическая погрешность отсутствует. После выявления погрешностей определяют значение усредненного коэффициента влияния λ_0 по формуле (56).

6-й этап. Установление закона преобразования входного сигнала для каждого ФУ по выходному параметру (см. разд. 3.1). Если выходных параметров несколько, то закон преобразования устанавливают для каждого параметра.

7-й этап. Определение передаточных функций для выявленных погрешностей (см. разд. 3.3).

8-й этап. Определение уровней точности и расчетных допусков на первичные погрешности. Этот этап является одним из важнейших, поскольку здесь проводится анализ технологичности схемы и конструкции. Предварительную оценку точностной технологичности конструкции и схемы можно провести с помощью предельных допусков (см. разд. 5.1). Сравнивая полученные значения этих допусков с допусками соответствующих уровней точности, делают выводы: обычно считают, что конструкция и схема технологичны, если предельные допуски на рассматриваемые элементы значительно превышают экономический уровень точности. Если предварительные результаты расчета признаны приемлемыми, то приступают к более точному расчету допусков на первичные погрешности, используя формулы (57)-(59). На основании рассчитанных значений допусков определяют уровни точности в соответствии с рекомендациями (60), а затем подбирают стандартные допуски, соответствующие расчетным. Анализируют полученные результаты. Если окажется, что в конструкции имеются элементы, для изготовления которых необходимы допуски, соответствующие

техническому уровню, то следует рассмотреть возможность расширения допуска на эти элементы за счет некоторого перераспределения допусков, например путем ужесточения допусков на слабовлияющие элементы (детали). Для этого выявляют и отбрасывают погрешности, для которых соблюдается условие

$$\delta q_{эi} \leqslant \frac{1}{5}\delta_0 q_i .$$

При этом количество отбрасываемых погрешностей не должно быть больше пяти. В случае большего числа погрешностей это условие должно быть пересмотрено. Для отбрасываемых погрешностей допуски устанавливают на экономическом уровне. Затем вычисляют уточненное значение коэффициента λ_0 по формуле (6I) и по формулам (57)-(59) - новые (расширенные) значения допусков на погрешности соответствующих элементов.

Если и после этого допуски на некоторые элементы останутся весьма жесткими, а потому трудно выполнимыми, то целесообразно расширить допуски на них за счет большего ужесточения допусков на слабо влияющие погрешности, например изготовление деталей на производственном уровне вместо ранее принятого экономического. Если и в этом случае не удается получить приемлемые значения допусков на сильно влияющие элементы, то следует предусмотреть в конструкции регулировочные устройства или компенсаторы. Тогда погрешность, устраняемая с помощью компенсатора, переводится в разряд ничтожно влияющих, затем вычисляют значение коэффициента λ_0'' и определяют значения допусков по формулам (57)-(59).

Найденные значения допусков округляют до стандартных значений (ближайших меньших).

9-й этап. Проведение проверочного расчета и оценка полученных результатов. Общим критерием приемлемости проектного расчета является выполнение условия (2). Допустимо превышение расчетной погрешности над заданной до I0 %.

6. ПРОВЕРОЧНЫЙ РАСЧЕТ ПУ НА ТОЧНОСТЬ

Проверочный расчет заключается в определении суммарной погрешности по заданным допускам на погрешности элементов. Этот вид расчета более простой, чем проектный, и позволяет решать задачи точностного расчета без применения последнего.

Недостатком проверочного расчета является то, что сам процесс расчета менее целенаправлен, а поэтому, особенно для сложных ПУ (ФУ), является весьма трудоемким при попытках установить оптимальные допуски на первичные погрешности, поскольку назначение и корректировка допусков носит весьма произвольный характер и во многом зависит от личного опыта и вкуса разработчика.

Проверочный расчет базируется на тех же формулах и подходах, что и проектный. Наиболее часто с его помощью решают следующие задачи:

1. Проверка правильности проектного расчета.

2. Проверка правильности назначения допусков на технологические первичные погрешности.

3. Отыскание оптимального варианта из нескольких возможных, а также внесение целесообразных изменений в конструкцию или схемотехнический состав ПУ (ФУ).

Применение проверочного расчета для решения первой задачи обычно не вызывает трудностей, поскольку все необходимые данные для его выполнения известны по результатам проектного расчета: установлены все первичные и теоретические погрешности и их характеристики, передаточные функции этих погрешностей, и задача сводится к определению частичных погрешностей и их суммированию по правилам, изложенным в 3.4.

Решение второй и третьей задач связано с некоторыми особенностями.

Этапы проверочного расчета с первого по пятый аналогичны рассмотренным выше для проектного расчета. Отличие заключается в том, что уже на пятом этапе разработчик назначает допуски на технологические погрешности, исходя из личного опыта и возможностей производства. Шестой и седьмой этапы расчета соответствуют этапам проектного расчета. Восьмой этап заключается в определении частичных влияний первичных, схемных теоретических и других систематических погрешностей и суммарной погрешности.

Значение суммарной погрешности сравнивают с заданной и принимают необходимое решение. При невыполнении условия (2) изменяют допуски на отдельные элементы и снова проводят расчеты и так до тех пор, пока не получат желаемого результата. Очевидно, что трудоемкость расчета при таком подходе

зависит от того, насколько удачно назначены разработчиком допуски на элементы (детали) в самом начале расчета. Поэтому совершенствование известных методик проверочного расчета связано с разработкой рекомендаций по выбору допусков и возможности оценки правильности принятых решений уже на этом этапе.

Один из возможных путей решения этой задачи основывается на сравнении коэффициентов влияния первичных погрешностей. В этом случае расчет хотя и сохраняет итерационный характер, однако назначение допусков носит более четкий характер. Первый – пятый этапы расчета аналогичны рассмотренным выше. Отличие заключается в том, что после выявления и распределения погрешностей по группам n_c, n_1 и n_2 и вычисления коэффициента λ_0 назначают допуски на все погрешности элементов ПУ (ФУ) на экономическом уровне (см. табл. I, 2). Затем устанавливают передаточные функции и вычисляют частичные погрешности каждого фактора и первичной погрешности. Коэффициенты влияния частичных погрешностей различных групп ($\lambda_{c э}$, $\lambda_{1э}$ и $\lambda_{2э}$) вычисляют по формулам (53)-(55). Найденные значения коэффициентов влияния сравнивают с усредненным значением коэффициента влияния λ_0 и оценивают влияние рассматриваемой погрешности в соответствии с табл. 5 [I0].

Таблица 5

Условия выбора уровня точности для допусков

Соотношения между коэффициентами влияния	Степень влияния частичной ошибки	Требуемый уровень точности
$\lambda_0 \leqslant \lambda_э$	Слабое	Экономический
$\lambda_э < \lambda_0 \leqslant \lambda_п$	Среднее	Производственный
$\lambda_п < \lambda_0 \leqslant \lambda_т$	Сильное	Технический
$\lambda_т < \lambda_0$	Очень сильное	Выше технического

Погрешности, для которых выполняется условие $\lambda_i \geqslant 3\lambda_0$, следует проверить на ничтожность влияния.

Когда отсутствуют систематические погрешности ($n_c = 0$) и ничтожно малые погрешности группы n_1 ($n_{1н} = 0$), коэффициент ничтожного влияния погрешностей группы n_2

$$\lambda_н = \sqrt{K\lambda_0 n_{2н}/(2\lambda_0 - n_1)}\,, \qquad (63)$$

где $K = 10$ (при 10%-ном риске) и $K = 20$ (при 5%-ном риске).

Если отсутствуют и погрешности группы n_1 ($n_1 = 0$), то

$$\lambda_н = \sqrt{K n_{2н}/2}\,. \qquad (64)$$

Для отбрасываемых погрешностей допуски устанавливают на экономическом уровне. Для неслучайных погрешностей принимают $\lambda_н = K n_н$.

Если для проверяемых погрешностей окажется $\lambda_i > \lambda_н$, то эти погрешности относят к ничтожно малым и они исключаются из дальнейшего расчета. После этого определяют уточненное значение коэффициента λ_0' по формуле (61).

Для остальных погрешностей при выполнении условия $\lambda_{эi} \geq \lambda_0'$ допуск, назначенный на экономическом уровне, подходит. Если $\lambda_{эi} < \lambda_0'$, то это означает, что допуск на рассматриваемую погрешность должен быть ужесточен до значения, соответствующего производственному уровню. После вычисления по формулам (53)–(55) коэффициентов влияния погрешностей λ_{ni} их сравнивают с λ_0' и устанавливают правильность назначения допусков. При этом должно выполняться условие $\lambda_{ni} > \lambda_0'$. Если это условие не выполняется, то необходимо назначить допуск на техническом уровне (см. табл. I). После вычисления по формулам (53)–(55) коэффициентов влияния погрешностей λ_{ri} проверяют выполнение условия $\lambda_{ri} \geq \lambda_0'$. Если оно выполняется, то назначенные допуски подходят, и расчет на этом заканчивается. Если $\lambda_{ri} < \lambda_0'$, то допуск не может быть выполнен и поэтому необходимо рассмотреть возможные пути обеспечения требуемой точности за счет применения компенсаторов, перераспределения допусков (за счет сужения допусков на слабо влияющие первичные погрешности) и т.д.

Применение рассмотренного подхода для определения первичных погрешностей факторов следует признать более эффективным по сравнению с обычной схемой проверочного расчета, особенно, если первичные погрешности неоднородны по своей физической природе. После назначения допусков на первичные погрешности и факторы выполняют проверочный расчет по обычной схеме.

Следует отметить, что к моменту выполнения точностного расчета разработчик располагает определенным вариантом конструктивного решения ПУ. На всех этапах точностного расчета возникает задача критического анализа имеющейся или совершенствуемой конструкции ПУ. Этот анализ следует начинать с проверки соответствия разработанной конструкции ПУ основным принципам рационального конструирования.

Рассмотрим основные принципы, которыми руководствуются при разработке точных ПУ [I-3, 6, 9].

I. Принцип кратчайшей цепи преобразования. Заключается в том, что цепь преобразования входного сигнала должна быть максимально короткой, т.е. содержать минимальное число преобразователей.

2. Правильность выбора схемотехнических элементов и их параметров. Устанавливается с учетом комплекса условий эксплуатации и изготовления. Общий принцип – предпочтительное применение элементов, технология изготовления и контроль которых хорошо отлажены. При анализе следует обратить внимание на передаточные отношения элементов. Рациональные передаточные отношения зависят от типа передач, например: для зубчатой передачи $i_{12} = 5$, для рычажной передачи $i_{12} = 4$ и т.д.

3. Рациональное размещение схемотехнических элементов в цепи преобразования. В соответствии с этим принципом функциональные элементы, которые обеспечивают наибольший масштаб преобразования, размещают в начале (для устройств типа мультипликаторов) или в конце цепи (для устройств типа редукторов). По этому принципу в измерительных приборах в конце измерительной цепи располагают элементы, имеющие относительно большое трение, большие погрешности профиля, а в начале – элементы с небольшим трением, малым износом, высокой точностью, с небольшим линейным или угловым перемещением (например, рычажные и кулачковые механизмы и др.).

Для механических устройств, кроме отмеченных выше, можно указать следующие общие принципы:

I. Конструкции деталей и соединений должны предусматривать возможность совместной технологической обработки (за один установ) рабочих и базовых элементов.

2. В конструкциях соединений базирование деталей должно осуществляться по рабочим элементам. Это позволяет сократить

число элементов, входящих в размерную цепь.

3. Необходимо обеспечить статическую определенность соединений и геометрическую определенность контактных пар.

4. Следует ограничивать смещение деталей и вылетов рабочих элементов.

5. Необходимо обеспечить статическую определенность механизмов.

6. Следует уточнить правильность назначения допусков и посадок и установить возможность их рационального перераспределения.

Если в результате анализа применяемых мероприятий не удается добиться необходимого качества, то следует рассмотреть возможность применения компенсаторов или изменения схемы ПУ.

7. ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТОЧНОСТИ ПУ С ПОМОЩЬЮ КОМПЕНСАТОРОВ

Как отмечалось выше, если для изготовления элементов конструкции или сборки ПУ необходимо выдерживать их параметры на техническом (или выше) уровне, то в конструкции необходимо применять компенсаторы. Поскольку в точных устройствах всегда присутствуют детали и узлы, требующие технического уровня изготовления, то практически ни один из них не обходится без компенсаторов. Применение компенсаторов обусловливается не только стремлением достичь необходимого значения показателя качества ПУ, но также повысить технологичность его конструкции, а также сделать более устойчивыми его характеристики во время эксплуатации. От правильного выбора типов компенсаторов и установления требований к их параметрам во многом зависит качество ПУ. При этом следует отметить, что применение компенсаторов не только усложняет конструкцию, но и повышает ее стоимость. В условиях серийного производства компенсаторы применяют, как правило, в тех случаях, когда невозможно получить необходимое качество, так как затраты на изготовление и регулировку компенсаторов значительно выше, чем при точном изготовлении деталей. В условиях единичного и мелкосерийного производства компенсаторы применяют не только для обеспечения показателей качества, но и для улучшения технологичности конструкции за счет расширения допусков на изготовление и сборку.

Под компенсацией подразумевается использование определен-

ных конструкторских, технологических и организационно-технических решений, приводящих к снижению влияния погрешностей и направленных на обеспечение необходимых показателей качества ПУ. С помощью компенсаторов можно полностью устранить или ослабить все виды погрешностей (теоретические, технологические и эксплуатационные), влияющие на качество ПУ. Хорошо компенсируются линейные частичные погрешности. Накопленные нелинейные погрешности также поддаются компенсации, но в этом случае полной компенсации достичь не удается, т.е. имеют место остаточные погрешности (так называемая недокомпенсация). К группе некомпенсируемых погрешностей относят местные искажения профилей поверхностей.

Рассмотрим кратко основные типы компенсаторов и методы компенсации. Компенсаторы подразделяются в зависимости от методов достижения показателей качества на компенсаторы источников погрешностей и компенсаторы частичных погрешностей. Действие компенсаторов первого типа основано на воздействии непосредственно на наиболее сильно влияющие источники погрешностей. Например, устранение или ослабление воздействия вибрации за счет применения амортизаторов; температуры – за счет подогрева или охлаждения ПУ и т.д. Действие компенсаторов второго типа основано на различных компенсационных методах, связанных с решением технологических, организационно-технических или конструкторских задач.

Технологический метод компенсации погрешностей в ПУ основан на устранении погрешностей при сборке ПУ путем пригонки (доводки), регулировки и юстировки. Подробно эти методы рассмотрены в [7, 9, 12, 15]. Метод пригонки связан с дополнительной обработкой деталей при сборке с целью компенсации отклонений характеристик материалов деталей и погрешностей их изготовления и сборки. Данный метод обеспечивает высокую надежность компенсации. Примерами этого метода являются прикатка зубчатых колес точных редукторов, притирка направляющих, подрезка оправ фотообъективов для обеспечения фокусировки и др.

Регулировка и юстировка ПУ и его ФУ осуществляются на заключительном этапе сборки путем перемещений деталей (для чего предусматриваются конструктивные компенсаторы) или изменения параметров элементов (в электронных устройствах) с по-

следующей фиксацией деталей и функциональных элементов в отрегулированном состоянии.

Организационно-технический метод компенсации основан на селективной сборке деталей и ФУ. Примером селективной сборки может служить комплектация револьверных головок микроскопов микрообъективами. Суть этой комплектации заключается в подборе микрообъективов для револьверной головки таким образом, чтобы при любом переключении револьверной головки изображение не уходило из поля зрения. Применяя этот метод, получают необходимые показатели качества, используя детали и функциональные элементы с широкими допусками. Недостатками метода являются так называемое незавершенное производство, поскольку число деталей и ФУ в группах, на которые они предварительно рассортировываются, различно и отсутствие полной взаимозаменяемости.

К организационно-техническим методам компенсации относят и такие мероприятия, как создание в помещениях, где эксплуатируются точные ПУ, постоянной температуры, давления, влажности (в соответствии с ТУ), а также отсутствие вибраций и т.п.

Конструктивные методы компенсации реализуются с помощью введения в конструкцию дополнительных элементов или регулировочных устройств, изменением размеров которых или их регулировкой добиваются устранения или ослабления действия соответствующих погрешностей.

На рис. 13а показано оптическое устройство со ступенчатым компенсатором (кольцо К), подрезкой или подбором которого обеспечивают фокусировку объектива. К регулировочным устройствам относятся простые конструкции (без введения дополнительных деталей), например соединение оправы объектива с корпусом по резьбе позволяет осуществить плавную фокусировку изображения (рис. 13б), а также сложные юстировочные устройства (регулировочные столики, регулируемые опоры, устройства для натяжения ленты в видеомагнитофонах и т.д.). На рис. 13в показан подшипниковый узел с эксцентриковой оправой, поворотом которой добиваются устранения эксцентриситета e . На рис. 13г изображена конструкция, позволяющая регулировать положение призмы с помощью винтовой передачи. Перемещением рычага вдоль паза компенсируют погрешности в синусном механизме (рис. 13д).

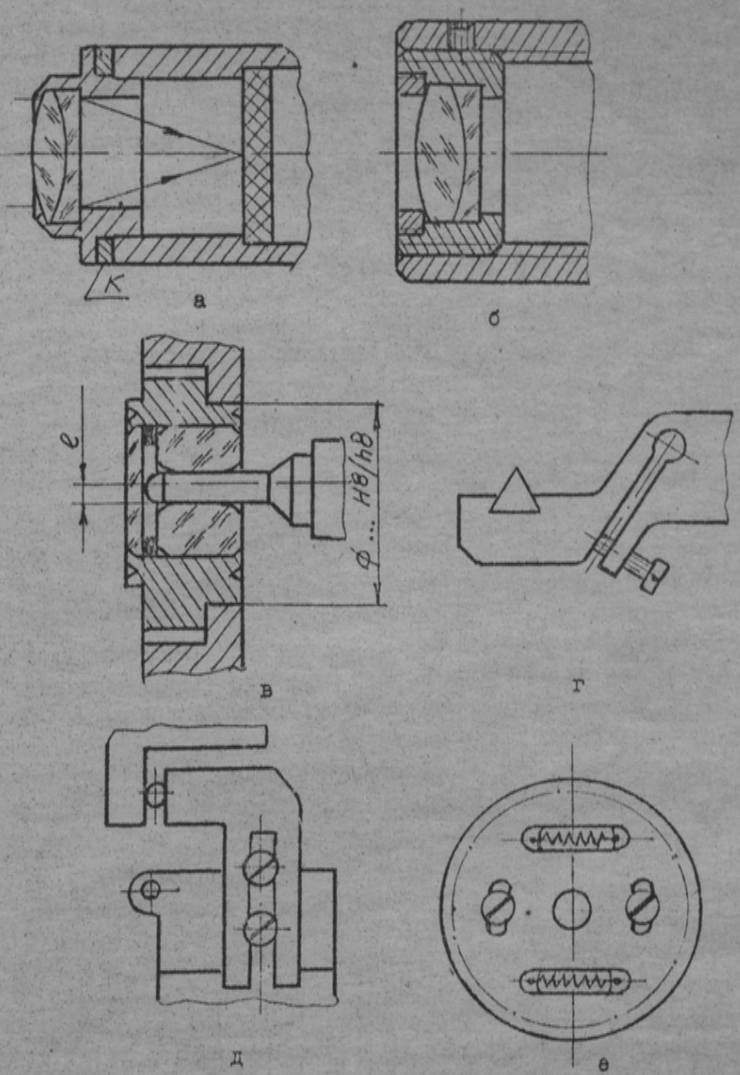


Рис. I3

Для устранения погрешностей сборки и изготовления, а также погрешностей от действия влияющих факторов применяют силовое замыкание с помощью упругих элементов. На рис. I3е показано безлюфтовое колесо, применяемое для устранения мертвого хода в зубчатых передачах. Переменные конденсаторы, резисторы и подобные им элементы также применяют в качестве компенсаторов.

В общем случае компенсаторы следует рассматривать как подсистему прибора, свойства которой можно характеризовать следующими показателями качества: точностью, порогом чувствительности, пределами регулировки и надежностью.

Точность компенсатора определяется неустранимой частью погрешности, т.е. недокомпенсацией или остаточным значением компенсируемой погрешности или фактора:

$$\Delta y_{кн} = \Delta y_{\Delta q} - \Delta y_к ; \qquad \Delta q_{кн} = \Delta q - \Delta q_к .$$

Порог чувствительности компенсатора характеризуется тем минимальным значением компенсируемой погрешности, которую можно устранить с помощью данного компенсатора. Например, для технологических методов порог чувствительности определяется минимальным слоем материала t_{min}, который может быть удален при обработке поверхности. При обработке поверхности резцом t_{min} = I0...20 мкм, а при доводке тонким абразивом t_{min} = I...2 мкм.

Пределы регулировки компенсатора характеризуются максимальным значением компенсируемой погрешности.

Надежность компенсатора характеризуется известными критериями надежности: безотказностью, долговечностью, сохраняемостью и ремонтопригодностью. Для оценки надежности компенсаторов можно пользоваться обычными методиками с учетом метода компенсации, свойств самого компенсатора, назначения и условий эксплуатации. Не останавливаясь на вопросах надежности компенсаторов, укажем лишь на то, что компенсаторы в виде регулировочных средств менее надежны по сравнению с неподвижными конструктивными компенсаторами (компенсаторами, получаемыми пригонкой или доводкой, а также компенсаторами в виде прокладок, колец).

Большое разнообразие конструкций и погрешностей ПУ, условий эксплуатации, методов компенсации и возможных конст-

руктивных решений самих компенсаторов, а также необходимость учета их показателей качества являются причиной того, что расчет компенсаторов представляет собой многофакторную задачу и ее успешное решение во многом зависит от личного опыта разработчика. Отметим, что на практике встречаются случаи, когда невозможно получить необходимые показатели качества, так как не предусмотрены компенсаторы или компенсаторы не обладают необходимой чувствительностью, диапазоном компенсации, надежностью. Часто это выявляется только при изготовлении опытных образцов или в процессе эксплуатации ПУ, когда трудно или невозможно что-либо исправить. Поэтому при разработке конструкции ПУ желательно предусмотреть необходимость применения компенсаторов еще на этапе проектного расчета, когда по заданному показателю качества определяют допуски составляющих элементов ПУ и ФУ.

В первом приближении необходимость применения компенсаторов возникает, если условие (2) не выполняется. Компенсатор должен устранить полностью или ослабить избыточную погрешность $\Delta y_\Sigma - [\delta_0 S]$. С учетом коррекционного воздействия компенсатора уравнение (2) можно записать в виде

$$\Delta y_\Sigma - \Delta y_K \leqslant [\delta_0 S], \qquad (65)$$

где Δy_K – коррекционное воздействие компенсатора.

Компенсаторы в ПУ могут одновременно использоваться для обеспечения нескольких показателей качества. Поэтому задача выбора числа компенсаторов и их параметров не может быть решена однозначно.

Рассмотрим методику расчета компенсаторов в процессе проектирования. Как указано выше, к моменту выполнения проектного расчета разработчик располагает тем или иным вариантом конструкции и, следовательно, первичные погрешности, их свойства и передаточные функции известны или могут быть определены. Поскольку большинство погрешностей ПУ носит случайный характер, то на стадии проектирования их конкретные численные значения неизвестны. Поэтому на практике принимают допущение о вероятностном суммировании погрешностей и случайным погрешностям придают определенные вероятностные значения. Кроме того, для уменьшения неопределенности решения задачи неравенство (65) превращают в равенство. Это позволяет установить значения

погрешностей, подлежащих компенсации, однако при этом не удается установить, какую именно погрешность следует компенсировать и в каком объеме. После выполнения проектного расчета определяют все погрешности и факторы, подлежащие компенсации. К ним относят погрешности деталей и ФУ, для изготовления которых требуется технический уровень. После выявления этих погрешностей и факторов разработчик намечает метод компенсации и тип компенсатора, учитывая условия производства и характер погрешностей.

Если компенсатор вносит поправку по сложному закону, то применяют несколько компенсаторов, каждый из которых вносит часть поправки по более простым законам. Число компенсаторов и вносимых ими поправок выбирается на основании разложения в ряд Тейлора функции

$$F(x) = a + bx + cx^2 + \dots .$$

Очевидно, что здесь погрешность a устраняют первым компенсатором, bx – вторым и т.д.

Если компенсатор полностью устраняет погрешность, то необходимо вычислить уточненное значение коэффициента λ'_0 и определить расширенные допуски на остальные элементы.

Необходимость компенсации погрешностей, соответствующих производственному уровню, решается в каждом конкретном случае дополнительно.

Рассмотрим порядок подбора компенсаторов при выполнении проверочного расчета, рассматривая его в качестве основного вида расчета на точность.

При проверочном расчете с помощью коэффициентов влияния устанавливают все погрешности и факторы, подлежащие компенсации. Для этих погрешностей и факторов значение коэффициента влияния $\lambda_i = |\delta_0 S / \Delta y_{\Delta Q}|$ меньше, чем наименьшее допустимое значение этого коэффициента λ_0, т.е. выполняется условие $\lambda_i < \lambda_0$ или $\lambda_i < \lambda'_0$. Коэффициенты влияния λ_0 и λ'_0 рассчитывают по формулам (56) и (61). После выявления погрешностей, требующих компенсации, разработчик намечает метод компенсации и тип компенсатора, учитывая при этом условия производства и эксплуатации, конструктивное оформление ПУ и характер погрешностей.

Точность компенсатора также может оцениваться с помощью коэффициента влияния

$$\lambda_{кн} = \delta_0 S / \Delta y_{кн} , \qquad (66)$$

где $\Delta y_{кн}$ – недокомпенсация (точность компенсатора). При этом, если выполняется условие $\lambda_н > \lambda_{кн} \geq \lambda'_0$, то можно считать, что влияние погрешности ослаблено до значения, не нарушающего требуемого качества. Если выполняется условие $\lambda_{кн} \geq \lambda_н$, то действие погрешности устранено полностью. Максимальное и минимальное значения недокомпенсации частичной погрешности равны

$$\Delta y_{кн\,max} = \delta_0 S / \lambda'_0 ; \qquad \Delta y_{кн\,min} = \delta_0 S / \lambda_н . \qquad (67)$$

Аналогично для максимального и минимального значений фактора, подлежащего компенсации, имеем

$$\Delta q_{кн\,max} = \Delta y_{кн\,max} / A_q ; \quad \Delta q_{кн\,min} = \Delta y_{кн\,min} / A_q . \qquad (68)$$

Действие компенсатора определяют по формуле

$$\Delta y_{кi} = A_{кj} \Delta K_i , \qquad (69)$$

где $A_{кj}$ – передаточная функция цепи выходное звено (элемент) ИУ – выход компенсатора; ΔK_i – корректирующее воздействие компенсатора.

Соотношение (69) имеет важное практическое значение при проектировании. Если компенсатор предварительно выбран и его корректирующее воздействие ΔK_i известно, то можно определить расположение компенсатора в рассматриваемой цепи по передаточной функции $A_{кj}$, исходя из значения компенсируемой частичной погрешности $\Delta y_{кi}$. Если положение компенсатора в цепи определено, т.е. известна функция $A_{кj}$, то можно найти необходимое корректирующее воздействие компенсатора ΔK_i , а следовательно, более точно определить метод компенсации, тип компенсатора и требования к величинам $A_{кj}$ и ΔK_i , которые устанавливают по формулам

$$A_{\kappa j\,max} = \delta_0 S/(\lambda_0 \Delta K_{j\,min}),$$

$$A_{\kappa j\,min} = \delta_0 S/(\lambda_н \Delta K_{j\,min}),$$

$$\Delta K_{j\,min} = \delta_0 S/(\lambda'_0 A_{\kappa j}), \qquad (70)$$

$$\Delta K'_{j\,min} = \delta_0 S/(\lambda_н A_{\kappa j}),$$

где $\Delta K_{j\,min}$ - минимальное значение коррекционного сигнала, обеспечивающего уменьшение погрешности до значения, позволяющего получить необходимое качество; $\Delta K'_{j\,min}$ - минимальное значение коррекционного сигнала, полностью компенсирующего действие погрешности.

Следует отметить, что чем меньше значение λ'_0, тем легче осуществить регулировку с помощью компенсатора.

Максимальное значение коррекционного сигнала компенсатора рассчитывают по формуле

$$\Delta K_{\kappa j\,max} = \delta_0 S/\lambda_i A_{\kappa j}. \qquad (71)$$

В сложных ПУ, как правило, используют несколько компенсаторов, поскольку одним компенсатором не всегда удается обеспечить необходимое качество. В этом случае сначала разрабатывают компенсатор, который устраняет наиболее сильно влияющую погрешность или позволяет компенсировать несколько погрешностей одновременно. После ввода первого компенсатора уточняют значение наименьшего допустимого коэффициента влияния с учётом его действия, которое обозначим $\lambda'_{0к}$ (компенсатор может увеличить или оставить неизменным число ничтожно малых погрешностей). Далее выявляют наличие погрешностей и факторов, у которых $\lambda_i < \lambda'_{0к}$. Если такие погрешности и факторы имеются, то вводят второй компенсатор, оценивают его действие и так далее до тех пор, пока для всех погрешностей не будет выполнено условие $\lambda_i < \lambda'_{0к}$. Следует отметить, что применяемые методы компенсации погрешностей индивидуальны для каждого конкретного изделия.

Приведенные методики удобны для практических расчетов. Однако, несмотря на простоту расчетных соотношений, сам процесс расчета сложных устройств (особенно при попытках оптими-

зации параметров) является весьма трудоемким. Применение ЭВМ позволяет преодолеть эти трудности, поскольку рассмотренные методики легко поддаются алгоритмизации, и поэтому разработка программ для машинной реализации методик как проектного, так и проверочного расчетов не представляет существенных трудностей. В настоящее время во многих организациях, в том числе и в МГТУ им. Н.Э.Баумана, существуют программы точностных расчетов в диалоговом режиме разработчика и ЭВМ. В настоящем пособии из-за ограниченного объема эти программы не приводятся.

В заключение отметим, что изложенные методики проектного и проверочного расчетов носят общий характер и не зависят от типа ПУ. Расчеты механических ПУ, помимо указанных выше, могут быть выполнены по известным методикам расчета размерных цепей.

8. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА ПУ НА ТОЧНОСТЬ

Пример 2. Определить допуски на первичные погрешности оптического микрометра (рис. I4), если суммарный допуск на точность равен I5 мкм. Номинальные параметры элементов микрометра: увеличение объектива $\beta = 10^{X}$, показатель преломления оптического стекла плоскопараллельной пластинки $n = 1{,}5$; толщина пластинки $d = 10$ мм, длина рычага $l = 20$ мм, шаг винта $t_в = 1$ мм, число заходов винта $k = 1$.

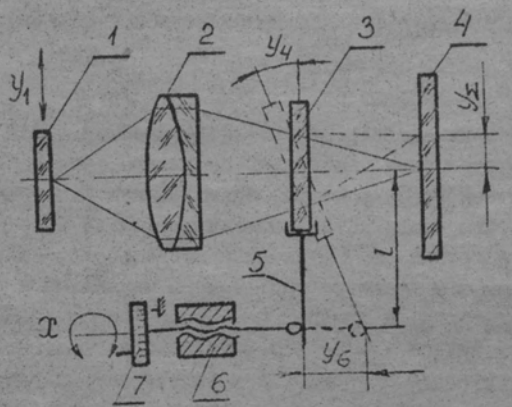


Рис. I4

Решение. Принцип действия оптического микрометра основан на построении объективом 2 изображения шкалы I в плоскости сетки 4. Поворотом пластинки 3 изображение шкалы может смещаться на величину Δy_Σ ; ее значение определяется углом поворота рукоятки 7 винтовой передачи 6. При перемещении винта на расстояние y_6 пластинка с помощью рычага 5 поворачивается на угол y_4.

Определим статическую характеристику механизма y_Σ. Предварительно запишем статические характеристики элементарных передач и функциональных устройств. Для винтовой передачи

$$y_6 = \frac{kt_в}{2\pi} x, \qquad (72)$$

угол поворота механизма пластинки (тангенсный механизм)

$$y_4 = \operatorname{arctg}(y/l), \qquad (73)$$

смещение изображения

$$y_\Sigma = [(n-1)/n]d y_4. \qquad (74)$$

С учетом соотношений (72)–(74) получим точную формулу для оптического микрометра

$$y_\Sigma^т = [(n-1)/n]d \operatorname{arctg}\left(\frac{kt_в}{2\pi l}\right) x. \qquad (75)$$

Заменим точную функцию приближенной и получим

$$y_\Sigma^{пр} = [(n-1)/n]d \cdot \frac{kt_в}{2\pi l} x. \qquad (76)$$

Для решения задачи следует пользоваться общей методикой проверочного расчета, поскольку параметры, определяющие точность оптического микрометра, имеют разную физическую природу.

На первом этапе устанавливаем источники погрешностей и их свойства. К группе m_c относятся погрешности, связанные с использованием в микрометре тангенсного механизма и плоскопараллельной пластинки; к группе m_1 – погрешности зазора винтовой передачи; к группе m_2 – все остальные погрешности.

Теоретические погрешности в оптическом микрометре связаны с применением тангенсного механизма и плоскопараллельной пластинки. Смещение изображения при повороте плоскопараллельной пластинки рассчитывают по формуле

$$y_{т0} = \left(1 - \frac{\cos\alpha}{\sqrt{n^2 - \sin^2\alpha}}\right) d \sin\alpha , \qquad (77)$$

где $y_{т0}$ – смещение изображения; α – угол падения светового потока на входную грань; d – толщина пластинки; n – показатель преломления стекла, из которого изготовлена плоскопараллельная пластинка. Для малых углов α принимают ($\alpha = 0$, $\cos\alpha \approx 1$, $\sin\alpha \cong \alpha$)

$$y_{тд} = \frac{n-1}{n} d \cdot \alpha . \qquad (78)$$

Тогда схемная погрешность

$$\Delta y_{псх} \approx \left(1 - \frac{\cos\alpha}{\sqrt{n^2 - \sin^2\alpha}}\right) d \sin\alpha - \left(\frac{n-1}{n}\right) d \cdot \alpha \qquad (79)$$

Схемная погрешность тангенсного механизма определяется по формуле

$$\Delta y_{тсх} = -\frac{1}{3} \frac{n-1}{n} d \left(\frac{x}{l}\right)^3 .$$

Общая теоретическая погрешность устройства определяется по формуле

$$\Delta y_{сх\Sigma} = \Delta y_{псх} + \Delta y_{тсх} = \left(1 - \frac{0{,}996}{\sqrt{1{,}5^2 - 0{,}087^2}}\right) 10 \cdot 0{,}087 -$$

$$- \frac{1{,}5-1}{1{,}5} 10 \cdot 0{,}085 - \frac{1}{3} \frac{1{,}5-1}{1{,}5} 10 \left(\frac{5}{20}\right)^3 \approx 0{,}005 \text{ мм} .$$

Таким образом, остаточная погрешность теоретической погрешности $\Delta y_{сх\Sigma} = 5$ мкм. По формуле (40) находим, что допуск на инструментальную погрешность – 10 мкм. Определим первичные погрешности на функциональные элементы. При расчетах номинальные значения параметров и уровни точности для первичных погрешностей взяты из [7]. С помощью дифференциального и геометрического методов устанавливаем расчетные формулы для частичных погрешностей (табл. 6), численные значения передаточных коэффициентов и приведенные допуски на первичные погрешности [10]. Значения A_i и $\delta_0 q$ даны в табл. 7. Порядок определения значений коэффициентов C_q и K_q приведен выше.

Таблица 6

Наименование погрешности и обозначение	Расчетная формула
Погрешность увеличения $\Delta\beta$	$\Delta p_\beta = (y/\beta)\Delta\beta$
Погрешность толщины пластинки Δd	$\Delta p_d = (y/d)\Delta d$
Погрешность показателя преломления стекла Δn	$\Delta p_n = [y/n(n-1)]\Delta n$
Смещения в шарнире $\Delta S_{\Delta c}$	$\Delta p_{\Delta c} = \frac{n-1}{n}\frac{d}{l}\Delta S_{\Delta c}$
Погрешность длины рычага Δl	$\Delta p_{\Delta l} = \frac{y}{l}\Delta l$
Погрешность формы опорной площадки тангенсного механизма Δh	$\Delta p_{\Delta h} = \frac{n-1}{n}\frac{d}{l}\Delta h$
Эксцентриситет сферы винта $\Delta e_в$	$\Delta p_{\Delta e} = \frac{y}{l} A_\nu \Delta e_в$
Погрешность шага резьбы $\Delta t_в$	$\Delta p_{\Delta t} = \frac{n-1}{n}\frac{d}{l}\Delta t_в$
Зазор в резьбе винтовой передачи $\Delta C_в$	$\Delta p_{\Delta C_в} = \frac{n-1}{n}\frac{d}{l}\Delta C_в$
Погрешность деления шкалы $\Delta\varphi_ш$	$\Delta p_{\Delta\varphi} = \frac{n-1}{n}\frac{d}{l}\frac{Kt_в}{2\pi}\Delta\varphi_ш$
Эксцентриситет шкалы $\Delta e_ш$	$\Delta p_{\Delta e} = \frac{n-1}{n}\frac{d}{l}\frac{Kt_в}{2\pi}A_\nu \Delta e_ш$

Таблица 7

Обозначение погрешности	Передаточный коэффициент A_i	Приведенный допуск $\delta_0 \varphi$	Коэффициенты влияния		
			$\lambda_э$	$\lambda_п$	$\lambda_т$
$\Delta\beta$	I00 мкм	0,I	0,I8	0,42	0,77
$\Delta\alpha$	0,I	I00 мкм	4,55	–	–
Δn	I330 мкм	0,0075	6,8	–	–
$\Delta S_{\Delta c}$	0,I67	60 мкм	5,45	–	–
Δl	0,05	200 мкм	4,55	–	–
Δh	0,I67	60 мкм	5,45	–	–
$\Delta e_в$	0,05	200 мкм	3,I0	6,2	–
$\Delta t_в$	0,I67	60 мкм	5,45	–	–
$\Delta C_в$	0,I67	60 мкм	0,55	–	–
$\Delta\varphi_ш$	0,008I мкм/мин	I240 мин	II7	–	–
$\Delta e_ш$	0,0027	3760 мкм	58	–	–

Вычисляем коэффициенты влияния по трем уравнениям точности. Значения допусков, соответствующих экономическому, производственному и техническому уровням выбираем по табл. I, 2. Значения коэффициентов влияния $\lambda_э$, $\lambda_п$ и $\lambda_т$ рассчитываем по формулам (53)-(55). Результаты расчетов предоставлены в табл. 8. Вычисляем усредненный коэффициент влияния λ_0 по формуле (56), принимая $n_1 = I$; $n_2 = I0$; $n_c = 0$. Получим $\lambda_c = 3,74$. Определяем уровни точности для каждой из указанных выше погрешностей из условия $\lambda_i \geq \lambda_0$ с учетом табл. 5. Сравнивая значения $\lambda_э$, $\lambda_п$ и $\lambda_т$ из табл. 8 с λ_0, можно установить, что наиболее сильное влияние имеют погрешности увеличения и зазоры. Их уровень точности должен быть выше технического. Погрешность $\Delta e_в$ соответствует производственному уровню точности, все остальные – экономическому.

Таблица 8

Обозначение погрешности	Допуски по уровням точности		
	Э	П	Т
$\Delta\beta$	5 %	2 %	I %
$\Delta\alpha$	20 мкм	I0 мкм	5 мкм
Δn	$I \cdot I0^{-3}$	$I \cdot I0^{-4}$	$I \cdot I0^{-4}$
$\Delta S_{\Delta c}$	I0 мкм	5 мкм	2 мкм
Δl	40 мкм	I0 мкм	5 мкм
Δh	I0 мкм	3 мкм	I мкм
$\Delta e_в$	20 мкм	I0 мкм	5 мкм
$\Delta t_в$	I0 мкм	5 мкм	2 мкм
$\Delta c_в$	I00 мкм	50 мкм	20 мкм
$\Delta\varphi_ш$	I0 мин	2 мин	I мин
$\Delta e_ш$	20 мкм	I0 мкм	5 мкм

Рассмотрим возможность снижения погрешностей $\Delta\beta$, $\Delta c_в$, $\Delta e_в$ за счет компенсационного метода, суть которого заключена в расширении допуска на сильновлияющие и ужесточения допуска на слабовлияющие погрешности; из табл. 7 видно, что погрешности $\Delta\varphi_ш$ и $\Delta e_ш$ могут быть отнесены к слабовлияющим, поскольку у них коэффициенты влияния значительно превышают усредненный коэффициент. Проверим погрешности $\Delta\varphi_ш$ и $\Delta e_ш$ по критерию ничтожности влияния. Если условие $\lambda_з \geq \lambda_и$ выполняется, то погрешность можно не учитывать. Коэффициент ничтожного влияния рассчитываем по формуле (63). При $K = 20$ (при 5%-ном риске) $\lambda_н = 4{,}7$. Поскольку условие $\lambda_з \geq \lambda_н$ выполняется с большим запасом, то следует проверить возможность перевода остальных погрешностей в ничтожно влияющие, соответствующие экономическому уровню. В этом случае для $n = 5$ по формуле (63)

$$\lambda_и = \sqrt{20 \cdot 3{,}7 \cdot 5 / (2 \cdot 3{,}7 - 1)} = 7{,}5.$$

Так как условие $\lambda_3 \geq \lambda_н$ не выполняется, то, следовательно, указанные погрешности отбрасывать нельзя.

Определим уточненное значение усредненного значения коэффициента влияния (без учета погрешностей $\Delta\varphi_ш$ и $\Delta C_ш$ из-за их ничтожности). По формуле (61) находим $\lambda'_0 = 3{,}2$. С учетом λ'_0 и табл. 7 можно сделать вывод, что за счет перераспределения допусков изменить допуски на погрешности ΔV_2, $\Delta C_в$ и $\Delta e_в$ не представляется возможным.

В результате расчета установлено, что уровень точности погрешностей $\Delta\beta_2$ и $\Delta C_в$ выше технического, поэтому необходимо применить компенсаторы. Для устранения погрешности увеличения $\Delta\beta_2$ в конструкции должна быть предусмотрена возможность регулировки положения объектива и сетки. Для устранения зазора в резьбе точных винтовых механизмов следует предусматривать силовое замыкание или применение разрезной гайки.

Пример 3. Определить степени точности и виды сопряжений для элементарных зубчатых передач пятиступенчатого редуктора (см. рис. 6), если мертвый ход редуктора $\delta\varphi_{мх\Sigma} = 10$ мин. Боковой зазор в зацеплениях не регулируется. Все зубчатые колеса редуктора – цилиндрические прямозубые. Модуль зубчатых колес $m = 0{,}5$ мм. Ведущие колеса z_1, z_3, z_5, z_7, z_9 имеют по 20 зубьев, а ведомые z_2, z_4, z_6, z_8 и z_{10} – по 60 зубьев. Влиянием упругого мертвого хода и мертвым ходом из-за зазоров в опорах можно пренебречь. Редуктор эксплуатируется при температуре +20...–30 °С.

Решение. Это задача проектного расчета, поскольку задан допуск на выходной параметр редуктора $\delta\varphi_{мх\Sigma}$, а требуется определить допуски на составляющие звенья. Поскольку первичные погрешности редуктора однородны и все они являются погрешностями мертвых ходов, то задачу удобно решать по упрощенной методике проектного расчета.

Мертвый ход элементарной передачи определяется боковым зазором, который является комплексной первичной погрешностью и может быть отнесен к группе n_1 (так как он имеет среднее значение). Для этой группы погрешностей допуски рассчитывают по формуле (58), где вместо $\delta_0 S$, δq, C_p, K_p вводят $\delta\varphi_{мх\Sigma}$, $\delta\varphi_{мхi}$, C_q, K_q соответственно:

$$\delta\varphi_{мхi} = \frac{\delta\varphi_{мх\Sigma}}{A_{VI-i}(C_Q + K_Q)\lambda_0}. \qquad (80)$$

Для определения погрешности мертвого хода элементарной передачи $\delta\varphi_{мхi}$ необходимо установить передаточный коэффициент этой погрешности A_{VI-i}, вероятностно-технологические коэффициенты C_Q и K_Q, коэффициент влияния λ_0. При расчетах примем, что погрешность мертвого хода отнесена к ведущему колесу.

Находим передаточные коэффициенты A_{VI-i} (по условию задания $i_{I-II} = i_{II-III} = \ldots = i_{V-VI} = \frac{z_2}{z_1} = 3$)

$$A_{VI-I} = \frac{1}{i_{I-VI}} = \frac{1}{i^5} = \frac{1}{3^5} = \frac{1}{243}; \quad A_{VI-II} = \frac{1}{i_{II-VI}} = \frac{1}{i^4} = \frac{1}{3^4} = \frac{1}{81};$$

$$A_{VI-III} = \frac{1}{i_{III-VI}} = \frac{1}{i^3} = \frac{1}{3^3} = \frac{1}{27}; \quad A_{VI-IV} = \frac{1}{i_{IV-VI}} = \frac{1}{i^2} = \frac{1}{3^2} = \frac{1}{9};$$

$$A_{VI-V} = \frac{1}{i_{V-VI}} = \frac{1}{i} = \frac{1}{3}.$$

Вероятностно-технологические коэффициенты C_Q и K_Q для боковых зазоров определяются уровнем точности. Можно принять для экономического уровня $K_Q = 1{,}0$ и $C_Q = 1{,}35$; для производственного – $K_Q = 1{,}1$ и $C_Q = 1{,}26$; для технического – $K_Q = 1{,}15$, $C_Q = 1{,}23$ [9]. Сумма коэффициентов K_Q и C_Q практически не зависит от уровня точности и равна приблизительно 2,35.

Коэффициент влияния λ_0 вычисляют по формуле (56). Для пятиступенчатого редуктора число элементарных погрешностей $n = 5$, причем все погрешности относятся к группе n_1. По формуле (56) при $n_c = 0$ и $n_2 = 0$ находим

$$\lambda_0 = \frac{n_1}{2} + \sqrt{0{,}25\,n_1} = \frac{5}{2} + \sqrt{0{,}25 \cdot 5} = 3{,}6.$$

Рассчитаем значения мертвых ходов элементарных передач по формуле (80)

$$\delta\varphi_{мх1} = \frac{\delta\varphi_{мх\Sigma}}{A_{VI-I}(C_Q + K_Q)\lambda_0} = \frac{10}{\frac{1}{243} \cdot 2{,}35 \cdot 3{,}6} = 287';$$

$$\delta\varphi_{мх2} = \frac{\delta\varphi_{мх\Sigma}}{A_{VI-II}(C_q + K_q)\lambda_0} = \frac{10}{\frac{1}{81}\cdot 2{,}35\cdot 3{,}6} = 98';$$

$$\delta\varphi_{мх3} = \frac{\delta\varphi_{мх\Sigma}}{A_{VI-III}(C_q + K_q)\lambda_0} = \frac{10}{\frac{1}{27}\cdot 2{,}35\cdot 3{,}6} = 33';$$

$$\delta\varphi_{мх4} = \frac{\delta\varphi_{мх\Sigma}}{A_{VI-IV}(C_q + K_q)\lambda_0} = \frac{10}{\frac{1}{9}\cdot 2{,}35\cdot 3{,}6} = 11';$$

$$\delta\varphi_{мх5} = \frac{\delta\varphi_{мх\Sigma}}{A_{VI-V}(C_q + K_q)\lambda_0} = \frac{10}{\frac{1}{3}\cdot 2{,}35\cdot 3{,}6} = 3{,}7'.$$

Определим расчетный боковой зазор j_{ni}. Мертвый ход элементарной передачи рассчитывают по формуле

$$\Delta\varphi_{мхс} = 7{,}32\,\frac{j_{ni}}{m z_i},$$

где m – модуль передачи; z – число зубьев. Полагая $\Delta\varphi_{мхi} = \delta\varphi_{мхi}$, $m = 0{,}5$ мм, $z = 20$, находим $j_{n1} = 393$ мкм, $j_{n2} = 131$ мкм, $j_{n3} = 43{,}6$ мкм, $j_{n4} = 14{,}5$ мкм, $j_{n5} = 4{,}8$ мкм.

По расчетным значениям боковых зазоров устанавливаем степень точности и вид сопряжения для зубчатых колес. Предварительно определяем необходимый минимальный боковой зазор $j^{p}_{n\,min}$ из условия температурной компенсации. По формуле

$$j^{p}_{n\,min} = 680\,\alpha_w\left[\alpha_{з.к}(t_{з.к} - 20^0) - \alpha_{кор}(t_{кор} - 20^0)\right],$$

где α_w – межосевое расстояние передачи; $\alpha_{з.к}$, $\alpha_{кор}$ – коэффициенты линейного расширения материалов зубчатого колеса и корпуса соответственно; $t_{з.к}$ и $t_{кор}$ – рабочая температура зубчатого колеса и корпуса соответственно.

Примем, что колесо изготовлено из стали ($\alpha_{з.к} = 11{,}5\cdot 10^{-6}$ 1/°С), корпус – из алюминиевого сплава ($\alpha_{кор} = 22{,}7\cdot 10^{-6}$ 1/°С). Межосевое расстояние $\alpha_w = \frac{m(z_1 + z_2)}{2} = 0{,}5(20+60)/2 = 20$ мм.

Находим

$$j^{p}_{n\,min} = 680 \cdot 20 \cdot [11{,}5 \cdot 10^{-6}(-30-20) - 22{,}6(-30-20)] = 7{,}9 \text{ мкм}.$$

Сравнивая полученное значение $j^{p}_{n\,min} = 7{,}9$ мкм со значениями наименьших боковых зазоров по ГОСТ 9178-72, находим, что все виды сопряжений, кроме сопряжения H, обеспечивают необходимую температурную компенсацию. По расчетным значениям j_n находим, что наиболее подходящим является сопряжение G, для которого табличные значения боковых зазоров равны: для технического уровня (6-я степень точности) $j_{n\,max}$ = = 38 мкм; для производственного (7-я степень) - $j_{n\,max}$ = = 42 мкм; для экономического (8-я степень) - $j_{n\,max}$ = = 45 мкм.

Сравниваем табличные и расчетные значения боковых зазоров, устанавливаем, что на I-й и 2-й ступенях редуктора расчетный боковой зазор значительно превышает стандартные значения, на 3-й ступени их значения близки, а на 4-й и 5-й ступенях расчетные значения ниже табличных и не могут быть получены в соответствии с действующим стандартом.

Рассмотрим возможные способы достижения необходимой точности. Первый способ заключается в расширении допусков на сильновлияющие погрешности за счет ужесточения допусков на слабовлияющие, второй способ основывается на устранении избыточного мертвого хода за счет введения компенсаторов.

Оценку вариантов сделаем на основе проверочного расчета. Примем, что все элементарные передачи изготовлены в соответствии с производственным уровнем точности (степень точности 7G).

Находим погрешность мертвого хода элементарных передач

$$\Delta\varphi_{мхi} = 7{,}32 \frac{j_{n\,max}}{m z} = 7{,}32 \frac{42}{0{,}5 \cdot 20} = 30{,}6'.$$

Суммарная погрешность мертвого хода редуктора (при $\Delta\varphi_{мх1} = \Delta\varphi_{мх2} = \ldots = \Delta\varphi_{мх5}$)

$$\Delta\varphi_{мх\Sigma} = \Delta\varphi_{мх1}\left(\frac{1}{i_{I\text{-}VI}} + \frac{1}{i_{II\text{-}VI}} + \frac{1}{i_{III\text{-}VI}} + \frac{1}{i_{IV\text{-}VI}} + \frac{1}{i_{V\text{-}VI}}\right) =$$

$$= 30{,}6\left(\frac{1}{273}+\frac{1}{81}+\frac{1}{27}+\frac{1}{9}+\frac{1}{3}\right) = 15{,}17'. \qquad (81)$$

Расчеты показывают, что при назначении допусков, соответствующих производственному уровню точности, погрешность редуктора не удовлетворяет требованию задания.

Рассмотрим возможность достижения точности за счет дополнительного введения компенсатора на 5-й ступени. В качестве компенсатора применим безлюфтовое колесо, которое практически устраняет мертвый ход в соответствующей ступени, т.е. можно пренебречь пятым членом в уравнении (81). Погрешность мертвого хода редуктора с компенсатором $\Delta\varphi_{мх\Sigma} = 4{,}97'$, что значительно превышает требования задания. Поэтому можно снизить требования к точности колес. Примем, что колеса изготовлены по 8-й степени точности с сопряжением F (на экономическом уровне). Для этого случая $\Delta\varphi_{мх\Sigma} = 7{,}09'$, что приемлемо.

ЛИТЕРАТУРА

1. Атлас конструкций элементов приборных устройств: Учеб. пособие / Буцев А.А., Еремеев А.И., Кокорев Ю.А. и др.; Под ред. О.Ф.Тищенко. М.: Машиностроение, 1982. 116 с.

2. Браславский Д.А., Петров В.В. Точность измерительных устройств. М.: Машиностроение, 1976. 312 с.

3. Грейм И.А. Элементы проектирования и расчет механизмов приборов. Л.: Машиностроение, 1972. 216 с.

4. Земельман М.А. Автоматическая коррекция погрешностей измерительных устройств. М.: Изд-во стандартов, 1972. 199 с.

5. Кемпинский М.М. Точность и надежность измерительных приборов. Л.: Машиностроение, 1972. 246 с.

6. Кокорев Ю.А., Жаров В.А., Ожерельев А.Я. Расчет электромеханического привода: Метод. указания. М.: МВТУ, 1988. 40 с.

7. Кокорев Ю.А. Способы расчета точностных характеристик деталей и узлов приборов: Учеб. пособие / Под ред. Баранова В.Н. М.: Изд-во МГТУ, 1992. 103 с.

8. Конструирование приборов / Под ред. В.Краузе. М.: Машиностроение, 1987. Ч. 1. 383 с.; Ч. 2. 376 с.

9. Коротков В.П., Тайц Б.А. Основы метрологии и теории

точности измерительных устройств. М.: Изд-во стандартов, 1978. 352 с.

10. Кулагин В.В. Основы конструирования оптических приборов. Л.: Машиностроение, 1982. 312 с.

11. Расчет электрических допусков радиоэлектронной аппаратуры / В.П.Гусев, А.В.Фомин, Г.М.Кунявский и др. М.: Сов. радио. 1963. 368 с.

12. Рудзит Я.А., Плуталов В.Н. Основы метрологии, точность и надежность в приборостроении: Учеб. пособие для студентов приборостроительных специальностей вузов. М.: Машиностроение, 1991. 304 с.

13. Справочник конструктора оптико-механических приборов / Под ред. В.А.Панова. Л.: Машиностроение, 1980. 744 с.

14. Тищенко О.Ф., Велединский А.С. Взаимозаменяемость, стандартизация и технические измерения. М.: Машиностроение, 1977. 358 с.

15. Шарловский Ю.В. Регулировочные устройства приборов и их элементы. М.: Машиностроение, 1976. 312 с.

16. Элементы приборных устройств. Основной курс /Под ред. О.Ф.Тищенко. М.: Высшая школа, 1978. Ч. 1. 304 с.; Ч. 2. 263 с

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение 3
I. Показатели и характеристики качества приборных устройств и функциональных узлов 4
2. Погрешности, влияющие на качество ПУ, их источники и характеристики I7
2.I. Источники погрешностей точных ПУ I7
2.2. Классификация и характеристика погрешностей, влияющих на качество ПУ I9
2.3. Основные характеристики и законы распределения первичных погрешностей 28
3. Зависимость показателя качества ПУ от первичных погрешностей и передаточных функций 34
3.I. Определение функции преобразования сигнала 34
3.2. Зависимость показателя качества ПУ от первичных погрешностей и факторов 35
3.3. Методы определения передаточных функций первичных погрешностей и факторов 37
3.4. Определение суммарной погрешности ПУ 45
4. Методы расчета ПУ на точность при проектировании 48
4.I. Виды расчетов на точность при проектировании ... 48
4.2. Определение допуска на приборную погрешность ... 49
4.3. Способы распределения допуска на приборную погрешность устройства между ФУ и элементами 5I
5. Проектный расчет ПУ на точность 54
5.I. Основные задачи и положения проектного расчета 54
5.2. Порядок выполнения проектного расчета ПУ на точность 59
6. Проверочный расчет ПУ на точность 6I
7. Обеспечение точности ПУ с помощью компенсаторов 66
8. Примеры расчета ПУ на точность 75
Литература 85

Редакция заказной литературы

Баранов Валерий Николаевич
Кокорев Юрий Алексеевич
Жаров Виктор Анатольевич

Расчет точности и обеспечение взаимозаменяемости элементов и узлов приборных устройств

Редактор Н.Г.Ковалевская

Корректор О.В.Калашникова

Подписано в печать 25.01.94. Формат 60x84/16. Бумага тип. № 2.
Печ.л. 5,5. Усл.печ.л. 5,12. Уч.-изд.л. 5,08.
Тираж 300 экз. Изд. № 69. Заказ 106 С 361

Издательство МГТУ, типография МГТУ.
107005, Москва, 2-я Бауманская, 5.