

Тульский государственный университет

РГБ ОА

22 ДЕК 2000

На правах рукописи



БЕЛОВ ДМИТРИЙ БОРИСОВИЧ

**АПРИОРНЫЙ АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ФРЕЗ
С ВИНТОВЫМ ЗАТЫЛОВАНИЕМ ВЕРОЯТНОСТНЫМИ
МЕТОДАМИ**

Специальности:

05.03.01 – Процессы механической и физико-технической обработки, станки и инструмент;

08.00.20 – Экономика стандартизации и управления качеством продукции

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Тула 2000

Работа выполнена на кафедре «Инструментальные и метрологические системы» Тульского государственного университета

Научный руководитель: кандидат технических наук,
доцент Соловьев С.И.

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
доцент Юдин С.В.

кандидат технических наук,
старший научный сотрудник
Моисеев Е.Ф.

Ведущее предприятие ОЛО АК «Туламанзавод»

Защита состоится «14» 12 2000 г. в 16 часов на заседании диссертационного совета Д 063.47.03 в Тульском государственном университете (300600, г. Тула, пр. Ленина, 92, ТулГУ, ауд. 9-101)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Тульского государственного университета (300600, г. Тула, пр. Ленина, 92)

Автореферат разослан «13» 11 2000 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д.т.н., проф.



Протасьев В.Б.

K722.536.4,0

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Проектирование сложных технических объектов подразумевает определение и увязку между собой значений входных параметров, которые обеспечат требуемое значение выходного параметра. Качественное изготовление этого объекта подразумевает исполнение входных параметров с такой точностью, которая обеспечит требуемую точность выходного параметра. Обычно эти задачи строго разделены между собой проектировщиком и технологом, причем последний решает данную задачу, используя либо предыдущий опыт, либо эмпирически. Современный подход к качеству продукции, заложенный в стандарты ИСО 9000 и др., рекомендует принимать меры по его обеспечению на этапе разработки продукции. Поскольку точность исполнения параметров технических объектов относится к важнейшему показателю качества, вопросы определения точности изготовления технических объектов на этапе их разработки являются весьма актуальными, а наиболее перспективным направлением решения указанной задачи является использование метрологических методов обработки измерительной информации.

Объектом исследования диссертационной работы являются случайные погрешности изготовления фрез с винтовым затылованием по наиболее важным функциональным параметрам

Предметом исследования диссертационной работы являются методы определения законов распределения вероятности (ЗРВ) случайных погрешностей изготовления наиболее важных расчетных функциональных параметров фрез с винтовым затылованием, определяющих их качество.

Используемые методы: В работе используются методы теории вероятностей и математической статистики, элементы теории проектирования металлорежущего инструмента, некоторые методы вычислительной математики. Разработка алгоритмов и программ расчета ЗРВ осуществлялась на основе механизма формирования случайных погрешностей при функциональном преобразовании ЗРВ.

Целью диссертационной работы является разработка методов расчета полей допусков входных параметров фрез с винтовым затылованием, обеспечивающих годность выходных параметров, имеющих расчетный характер.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- разработан метод функционального преобразования ЗРВ входных параметров, в соответствии с методами расчета выходных (функциональных) параметров фрез с винтовым затылованием, неусложняющий этот расчет;
- разработан метод установления степени близости расчетных ЗРВ выходных параметров к гипотетическим теоретическим моделям;

- разработан метод управления точностью изготовления инструмента по функциональным параметрам, распределение вероятности которых близко к нормальному;
- проведен анализ случайных погрешностей изготовления стандартных фрез с винтовым затылованием, изготавливаемых на резьбошлифовальном оборудовании;
- разработан программно - методический комплекс (ПМК) по расчету полей допусков конструктивных и технологических параметров фрез с винтовым затылованием.

Научная новизна работы заключается в создании методов управления точностью изготовления фрез с винтовым затылованием по функциональным параметрам, имеющих расчетный характер, базирующихся на функциональном преобразовании ЗРВ входных параметров объектов в соответствии с функциональными преобразованиями самих параметров. Созданные методы, интервальный и точечный, позволяют решать задачи управления точностью изготовления фрез с винтовым затылованием и других технических объектов различной сложности на этапе их проектирования.

Практическая ценность работы заключается в расчете полей допусков функциональных параметров фрез с винтовым затылованием, образуемых случайными составляющими погрешностей их изготовления; в алгоритмическом и программном обеспечении функционального преобразования ЗРВ входных параметров; алгоритмическом и программном обеспечении расчета числовых характеристик ЗРВ функционального параметра (среднего значения \bar{Q} и среднего квадратического отклонения (СКО) S_{σ}), для случая, когда закон задан в табличном виде; проведении анализа точности изготовления резьбовых гребенчатых (ГОСТ 1336-77) и мелкодульных червячных фрез с винтовым затылованием (ГОСТ 10331-81).

Достоверность полученных результатов подтверждается высокой сходимостью результатов расчетов с результатами эмпирических исследований точности фрез с винтовым затылованием, проводимых кафедрой ИМС Тульского государственного университета; корректным применением методов теории вероятностей и математической статистики; совпадением результатов решений отдельных частных задач, выполненных ранее строгими аналитическими методами, с решениями этих же задач методами, предлагаемыми в работе.

Реализация результатов диссертационной работы. Результаты диссертационной работы были использованы в рамках выполнения научно-технической программы «Ресурсосберегающие технологии машиностроения» на ОАО АК «Туламашзавод» при расчетах погрешностей изготовления фрез с винтовым затылованием для обработки резьб М12...М30 и в учебных курсах «Теоретическая метрология», «Прикладная метрология» и

«Основы квалиметрии» на кафедре ИМС Тульского государственного университета.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались на следующих конференциях и семинарах. 1. 5-я всероссийская научно-техническая конференция «Состояние и проблемы технических измерений» (г. Москва, 1998 г.). 2. Научно-техническая конференция «Теория, технология, оборудование и автоматизация обработки металлов давлением и резанием» (г. Тула, ТулГУ, 1999 г.). 3. 6-я всероссийская научно-техническая конференция «Состояние и проблемы измерений» (г. Москва, 1999 г.). 4. Международная конференция «Современные проблемы и методология проектирования и производства силовых зубчатых передач» (г. Тула, ТулГУ, 2000 г.). 5. Научно-практические конференции профессорско-преподавательского состава ТулГУ (г. Тула, 1998-2000 г.г.).

Публикации. По результатам исследований опубликовано 14 печатных работ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех разделов и заключения, изложенных на 165 страницах машинописного текста, содержит 56 рисунков, 40 таблиц, список использованной литературы из 73 наименований и три приложения.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбора темы диссертационной работы, сформулирована ее основная задача и научная новизна.

В первой главе диссертации рассматривается постановка задачи, сущность которой заключается в разработке метода назначения полей допусков входных параметров объекта, в зависимости от функциональной связи между входными и выходным параметрами и вида их ЗРВ. Поскольку данная задача решается метрологическими методами, в работе приводится в четкое соответствие метрологическая и технологическая терминология и формулируются понятия, которые в практике допускают неоднозначное толкование. Наиболее важными являются определения конструктивных и технологических параметров, правильности и точности изготовления.

Технологическим параметром следует называть входной параметр, который при изготовлении объекта будет непосредственно выполняться на оборудовании, но не определять качество объекта напрямую. Конструктивным следует называть такой выходной параметр объекта, который определяет его функциональное назначение и качество, но непосредственно на оборудовании не изготавливается, а образуется путем взаимодействия технологических параметров.

Понятие правильность изготовления характеризует близость к нулю систематических погрешностей изготовления, т.е. таких, которые заклады-

ваются на стадии конструкторской подготовки, как самого изделия, так и технологической оснастки, например, замена сложного профиля режущей кромки инструмента простыми технологическими линиями и т.д. Понятие точность изготовления подразумевает стабильность значений конструктивных параметров при изменяющихся в пределах поля допуска значениях технологических параметров, т.е. близость к нулю случайных погрешностей. Такие погрешности возникают из-за жесткости оборудования, неоднородности материалов заготовок и т.д.

Таким образом, эти понятия отражают разную природу формирования погрешности изготовления изделий. В работе будут рассматриваться только такие погрешности, которые носят случайный характер, поскольку формирование и расчет систематических погрешностей достаточно подробно разработаны в рамках инструментальной науки.

На практике поля допусков назначаются одним из шести способов: аналитическим; считают ЗРВ конструктивного параметра нормальным, принимая поле допуска $\pm 3\sigma$; используют неравенство П.Л. Чебышева; исследуют ЗРВ конструктивного параметра на опытных партиях деталей; представляют погрешность конструктивного параметра в виде полного дифференциала; имитационным моделированием. Анализ показал, что каждый из этих способов имеет существенные недостатки. Поэтому важнейшим этапом решения рассматриваемой задачи является разработка метода функционального преобразования ЗРВ технологических параметров, не усложняющего расчет и проектирование самого инструмента, который будет положен в основу расчета необходимых полей допусков.

Во второй главе диссертации разработан метод функционального преобразования ЗРВ технологических параметров, который использует механизм формирования случайной (косвенной) величины, образуемой некоррелированными (независимыми) входными величинами. Пусть конструктивный параметр Q , формируется двумя технологическими параметрами x_1 и x_2 , содержащими в себе случайные погрешности, а связь между ними описывается зависимостью:

$$Q = f(x_1, x_2). \quad (1)$$

Механизм формирования случайной погрешности параметра Q заключается в том, что его значение может быть получено подстановкой в формулу (1) любых комбинаций значений параметров x_1 и x_2 .

Смоделируем ЗРВ технологических параметров гистограммами (рис. 1), получаемыми при переходе от непрерывного теоретического к такому же по виду, но дискретному распределению вероятности. Для построения ЗРВ параметра Q будем комбинировать между собой не отдельные значения параметров x_1 и x_2 , а интервалы их значений, которые следует брать из соответствующих моделей (гистограмм) путем подстановки их в формулу (1). В зависимости от того, в каком виде производится подстановка

значений параметров x_1 и x_2 в формулу (1), комбинирование или перебор реализуется в двух вариантах:

- интервальном (в формулу (1) подставляются начала и концы интервалов технологических параметров);
- точечном (в формулу (1) подставляются середины интервалов технологических параметров).

При интервальном варианте сначала необходимо рассчитать интервалы значений конструктивного параметра по формуле (1). Начало интервала определяется подстановкой в формулу (1) значений начал интервалов увеличивающихся и значений концов интервалов уменьшающихся технологических параметров. Конец интервала конструктивного параметра определяется аналогично путем подстановки в формулу (1) значений концов интервалов увеличивающихся и значений начал интервалов уменьшающихся технологических параметров. Термины “увеличивающий” и “уменьшающий” параметры заимствованы из теории расчета размерных цепей. В нашем случае будем считать, что x_1 - увеличивающий параметр, а x_2 - уменьшающий параметр.

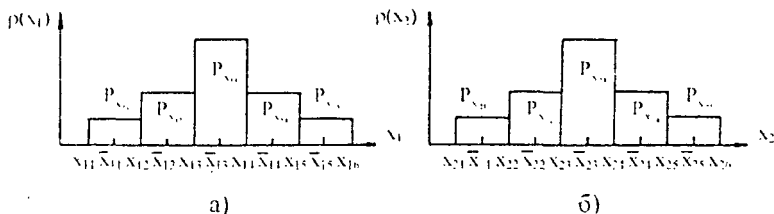


Рис. 1. Модели ЗРВ технологических параметров: а) параметра x_1 ; б) параметра x_2 ($x_{11}, x_{12}, \dots, x_{16}$ - границы интервалов значений параметра x_1 ; $\bar{x}_{11}, \bar{x}_{12}, \dots, \bar{x}_{15}$ - середины интервалов значений параметра x_1 ; $x_{21}, x_{22}, \dots, x_{26}$ - границы интервалов значений параметра x_2 ; $\bar{x}_{21}, \bar{x}_{22}, \dots, \bar{x}_{25}$ - середины интервалов значений параметра x_2 ; $P_{x_{11}}, P_{x_{12}}, \dots, P_{x_{15}}$ - вероятности попадания значений параметра x_1 в соответствующий интервал; $P_{x_{21}}, P_{x_{22}}, \dots, P_{x_{25}}$ - вероятности попадания значений параметра x_2 в соответствующий интервал).

Для построения ЗРВ конструктивного параметра, необходимо перебрать все возможные комбинации значений технологических параметров, составляющих модель (табл. 1). В данной таблице начала и концы интервалов параметра Q обозначены как значения функции $f(x_{1i}, x_{2j})$. Например, начало первого интервала определяется как $f(x_{11}, x_{22})$, а конец $f(x_{12}, x_{21})$.

Таблица 1

Возможные комбинации интервалов технологических параметров

№ интервала	Интервал значений параметра x_1		Интервал значений параметра x_2		Интервал значений параметра Q		Вероятность P_Q
	Начало	Конец	Начало	Конец	Начало	Конец	
1	x_{11}	x_{12}	x_{21}	x_{22}	$f(x_{11}, x_{22})$	$f(x_{12}, x_{21})$	$P_{x_{11}} \cdot P_{x_{21}}$
...
5	x_{11}	x_{12}	x_{25}	x_{26}	$f(x_{11}, x_{26})$	$f(x_{12}, x_{25})$	$P_{x_{11}} \cdot P_{x_{25}}$
...
21	x_{15}	x_{16}	x_{21}	x_{22}	$f(x_{15}, x_{22})$	$f(x_{16}, x_{21})$	$P_{x_{15}} \cdot P_{x_{21}}$
...
25	x_{15}	x_{16}	x_{25}	x_{26}	$f(x_{15}, x_{26})$	$f(x_{16}, x_{25})$	$P_{x_{15}} \cdot P_{x_{25}}$

Вероятность попадания интервалы $[f(x_{11}, x_{22}); f(x_{12}, x_{21})]$ в т.д. параметра Q равна произведению вероятностей попадания значений технологических параметров в комбинируемые интервалы, взятых из соответствующих гистограмм, что соответствует значению вероятности одновременного наступления нескольких событий. Ввиду малости интервалов параметра Q, принимаем распределение вероятности в их пределах равномерным. В результате такого перебора получается массив из N - интервалов конструктивного параметра Q и N - вероятностей P_Q попадания в них. В общем случае эти интервалы частично или полностью перекрываются между собой (рис. 2а).

Для объединения перекрывающихся интервалов конструктивного параметра, необходимо перейти от вероятностей P_i, P_j, P_m к плотностям вероятностей ρ_i, ρ_j, ρ_m определяемым следующим образом:

$$\rho_i = P_i / ab; \rho_j = P_j / cd; \rho_m = P_m / ef. \quad (2)$$

Окончательно плотность вероятности определяется: на участке ac - как ρ_i ; се - как $(\rho_i + \rho_j)$; eb - как $(\rho_i + \rho_j + \rho_m)$; bd - как $(\rho_i + \rho_j + \rho_m - \rho_j)$ или $(\rho_i + \rho_m)$ и т.д.

Окончательно вид фрагмента показан на рис. 2б.

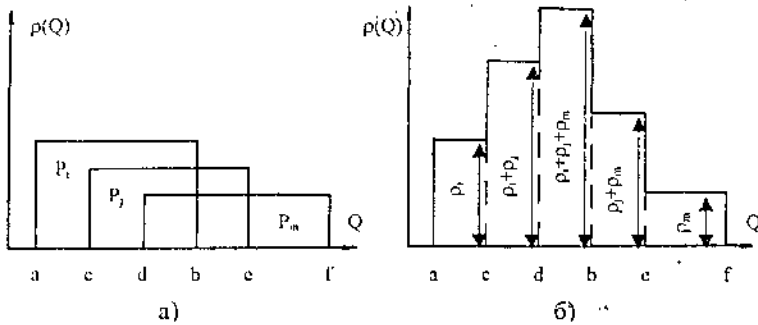


Рис. 2. Построение ЗРВ конструктивного параметра; а) фрагмент массива интервалов конструктивного параметра; б) фрагмент ЗРВ конструктивного параметра

Таким образом получим гистограмму распределения вероятности конструктивного параметра Q , которая ввиду малости участков ac , ce и т.д. (рис. 3) практически не отличается от дифференциальной кривой распределения плотности вероятности.

На этом же примере рассмотрим точечный вариант метода построения ЗРВ конструктивного параметра. Как и в первом случае, ЗРВ моделируются гистограммами (рис. 1), только для определения значений конструктивного параметра будем оперировать серединами интервалов технологических параметров, наделенными весами, равными вероятностям попадания в интервал гистограммы. Механизм формирования значений конструктивного параметра такой же, как и в случае, описанном выше, только в данной ситуации, для получения значений конструктивного параметра перебору подвергаются все возможные комбинации значений середин интервалов технологических параметров, путем подстановки их в формулу (1) (табл. 2).

Таблица 2

Возможные комбинации середин интервалов технологических параметров

№ интервала	Середина интервала параметра x_1	Середина интервала параметра x_2	Значение параметра Q	Вероятность P_Q
1	x_{11}	x_{21}	$f(x_{11}, x_{21})$	$P_{x_{11}} \cdot P_{x_{21}}$
...
5	x_{11}	x_{25}	$f(x_{11}, x_{25})$	$P_{x_{11}} \cdot P_{x_{25}}$
...
21	x_{15}	x_{21}	$f(x_{15}, x_{21})$	$P_{x_{15}} \cdot P_{x_{21}}$
...
25	x_{15}	x_{25}	$f(x_{15}, x_{25})$	$P_{x_{15}} \cdot P_{x_{25}}$

Вероятности рассчитанных таким образом значений конструктивного параметра равны произведению вероятностей попадания значений технологических параметров в комбинируемые интервалы, т.е. вероятностей, характеризующих вес середин каждого интервала исходных данных.

Таким образом искомый ЗРВ конструктивного параметра получается в виде гистограммы в соответствии с рис. 3.

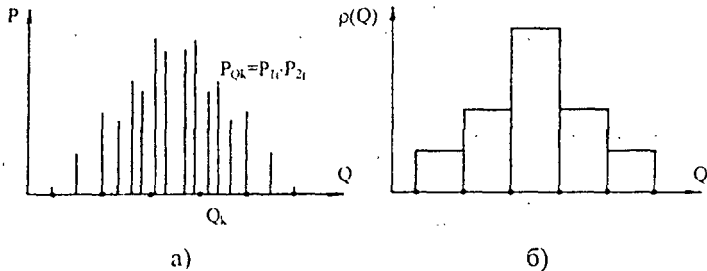


Рис. 3. Формирование окончательной гистограммы при точечном варианте метода: а) расположение и веса расчетных середин интервалов параметра Q; б) окончательная гистограмма.

В третьей главе диссертации рассматривается важнейший этап решения поставленной задачи – применение метода функционального преобразования ЗРВ технологических параметров резбовых гребенчатых (ГОСТ 1336-77) и червячных мелко модульных фрез с винтовым затылованием для обработки зубчатых колес с эвольвентным профилем зуба (ГОСТ 10331-81) и расчет их полей допусков.

Установлено, что случайные (технологические) погрешности конструктивных параметров фрез с винтовым затылованием имеют различную структуру: простейшие погрешности, образующиеся непосредственно; погрешности, образующиеся путем накопления их отдельных случайных составляющих; погрешности, объединяющие совокупность (не сумму) своих отдельных составляющих. Каждая группа погрешностей имеет индивидуальные особенности расчета.

К первой группе относятся шаг режущих зубьев P_{op} на длине шага P резьбы и углы профиля зубьев Ω_{op} и $\Omega_{за}$ резбовых гребенчатых фрез, а также осевой шаг фрезы P_z , измеренный вдоль одной из реек от зуба к зубу (шаг P_{z0}) червячных фрез. Ко второй группе относятся накопленные погрешности шага P_{op} на длине 10 шагов P резьбы и аналогичные погрешности шага P_z , измеренного на длине любых двух соседних шагов (шаг P_{z20}). К третьей группе относятся отклонения f_{h10} и f_{h20} винтовой линии фрезы на одном и двух оборотах соответственно червячных фрез.

Конструктивные параметры и их погрешности формируются технологическими параметрами, определяющими собой правую и левую много-

заходные поверхности, а также переднюю поверхность. К ним относятся: $P_{пр}$, $P_{лев}$ - шаги правой и левой винтовых поверхностей соответственно; $i_{пр}$, $i_{лев}$ - числа заходов правой и левой винтовых поверхностей соответственно; γ - передний угол; $\Omega_{пр}^1$, $\Omega_{лев}^1$ - углы профиля зуба при угле $\gamma = 0$ (технологические углы профиля); ω - угол подъема винтовой стружечной канавки.

Шаги $P_{пр}$, $P_{лев}$ и числа заходов $i_{пр}$, $i_{лев}$ на станке непосредственно не обрабатываются, а, следовательно, не могут быть пронормированы по точности. С этих позиций в качестве технологических параметров следует использовать ходы правой и левой винтовых поверхностей $p_{пр}$, $p_{лев}$ и углы деления на заход $\psi_{пр}$, $\psi_{лев}$. Между указанными параметрами существует прямая связь: $p_{пр,лев} = P_{пр,лев} \cdot i_{пр,лев}$, $\psi_{пр,лев} = 2\pi / i_{пр,лев}$. Таким образом, для обеспечения точности исполнения рассмотренных ранее конструктивных параметров необходимо задавать поля допусков следующих технологических параметров: $p_{пр}$ и $p_{лев}$, $\psi_{пр}$ и $\psi_{лев}$, γ , $\Omega_{пр}^1$ и $\Omega_{лев}^1$, ω .

Поскольку обычно исправное технологическое оборудование обеспечивает нормальные ЗРВ погрешностей изготовления, поэтому модели вероятностей технологических параметров представлялись в соответствующем виде. Полагая, что погрешности δ станка заданы в паспорте с вероятностью 0,9973, как это чаще всего принято в машиностроении, оценим значение среднего квадратического отклонения по формуле: $S_{\delta} = \delta / 3$ и смоделируем ЗРВ технологических параметров, установив их размах $\pm 4S_{\delta}$. ЗРВ перечисленных выше конструктивных параметров фрез с винтовым затылованием строились интервальным вариантом метода построения ЗРВ.

В данной главе диссертации произведен расчет только тех случайных (технологических) погрешностей изготовления фрез с винтовым затылованием, точность которых повышается при замене традиционного затылования винтовым.

Для расчета полей допусков конструктивных параметров, имеющих погрешности первой группы, необходимо знать формулы, описывающие связь конструктивных параметров с технологическими.

Шаг $P_{пр}$ и углы профиля $\Omega_{пр}$, $\Omega_{лев}$ резьбовых гребенчатых фрез с винтовым затылованием определяются по формулам:

$$P_{пр} = \frac{1}{2\pi} (\psi_{пр} + \psi_{лев}) \cdot \frac{1}{p_{пр}^{-1} + p_{лев}^{-1}} \quad (3)$$

$$\text{tg} \Omega_{пр,лев}^1 = \frac{\text{tg} \Omega_{пр,лев}^1 - (p_{пр,лев} / \pi D_f) \cdot \text{tg} \gamma \sqrt{1 + \text{tg}^2 \omega}}{1 \mp (p_{пр,лев} / \pi D_f) \cdot \text{tg} \omega} \quad (4)$$

Шаг P_{χ} соответствует шагу основного червяка $P_{оч}$ червячных фрез и определяется по формуле:

$$P_{\chi} = \frac{1}{2\pi(\psi_{пр}^{-1}P_{пр}^{-1} + \psi_{лев}^{-1}P_{лев}^{-1})}. \quad (5)$$

Поля допусков конструктивных параметров определяются в соответствии с рис. 4.

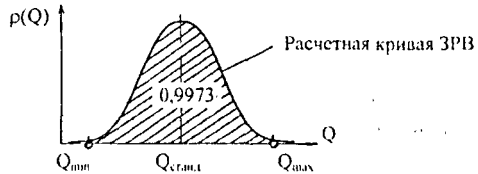


Рис. 4. Формирование полей допусков конструктивных параметров.

Для расчета полей допусков конструктивных параметров, содержащих вторую группу погрешностей, необходимо учитывать случайный характер их накопления, т.е. сначала определить дисперсию или среднее квадратическое отклонение суммарной погрешности:

$$S_{\Sigma} = \sqrt{\sum_{i=1}^n S_{\chi_i}^2}, \quad (6)$$

а затем исходя из вида ЗРВ определить и саму погрешность. Применительно к параметрам $P_{пр}$ и P_{χ} формула (6) примет вид: $S_{P_{пр}} = \sqrt{10} \cdot S_{\chi}$, $S_{P_{\chi}} = \sqrt{2} \cdot S_{\chi}$. Поскольку вероятность суммы нормально распределенных величин также распределена нормально, окончательная погрешность с вероятностью $P = 0,9973$ находится следующим образом:

$$\delta_{\Sigma} = \pm 3S_{\Sigma}. \quad (7)$$

Для расчета полей допусков конструктивных параметров $\Gamma_{нв}$ и $\Gamma_{св}$, содержащих погрешности третьей группы, необходимо описать какой-либо зависимостью ситуацию, когда все зубья основного червяка расположены на одной винтовой линии. Специальной формулы, описывающей принадлежность зубьев червяка винтовой линии нет. В традиционно затылованных червячных фрезах эти параметры совпадают с технологическими и измеряются непосредственно. У фрез с винтовым затылованием основной червяк образуется, благодаря специально рассчитанному соотношению чисел заходов $i_{пр}$ и $i_{лев}$ ($\psi_{пр}$ и $\psi_{лев}$). В качестве такой зависимости следует использовать величину последовательного смещения зубьев червяка (конструктивную подачу S_{χ}):

$$S_{\chi} = \frac{\psi_{пр}\psi_{лев}}{4\pi^2(p_{пр}^{-1} + p_{лев}^{-1})}. \quad (8)$$

Если величина S_x является постоянной, то отклонения f_{h0} и f_{h20} равны нулю. Нестабильность параметра S_x и будет характеризовать величину отклонений f_{h0} и f_{h20} . Параметры f_{h0} и f_{h20} формируются различным количеством объектов (зубьев): $f_{h0} - z/2$ зубьями; $f_{h20} - z$ зубьями. Поэтому вероятности годности фрез (которые не должны быть меньше 0,9973), по параметрам f_{h0} и f_{h20} рассчитываются по формулам:

$$P_{10,10}^{f_{h0}} = P^z \quad (\text{для четн. числа } z), \quad P_{\text{годн}}^{f_{h0}} = P'^{z/2} \quad (\text{для нечетн. числа } z), \quad (9)$$

$$P_{\text{годн}}^{f_{h20}} = P', \quad (10)$$

где P – вероятность того, что отклонение от винтовой линии одного зуба не превысит значений f_{h0} и f_{h20} .

Рассчитав из формул (9) и (10) значения вероятностей P , можно в соответствии с рис. 4 определить границы поля допуска, в котором должен находиться параметр S_x .

Были проведены расчеты полей допусков конструктивных параметров для всех типоразмеров резьбовых гребенчатых и мелко модульных червячных фрез с винтовым затылованием. Доказано, что при использовании для изготовления фрез с винтовым затылованием резьбошлифовального оборудования (универсальный резьбошлифовальный станок модели 5820) точность изготовления (близость к нулю случайных погрешностей) резьбовых гребенчатых и мелко модульных червячных фрез обеспечивается со значительным запасом по сравнению с требованиями стандартов (для червячных фрез выше класса В).

В четвертой главе диссертации рассматривается анализ точности изготовления фрез с винтовым затылованием при ЗРВ конструктивных параметров, близких к нормальному и методика расчета полей допусков этих параметров.

Для нормально распределенных параметров x_i и Q справедливо следующее соотношение:

$$S_Q^2 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f(x_i)}{\partial x_i} S_{x_i} \right)^2, \quad (11)$$

где S_Q и S_{x_i} – оценки средних квадратических отклонений параметров Q и x_i

$\frac{\partial f(x_i)}{\partial x_i}$ – частная производная функции $f(x_i)$ по параметру x_i ; $\frac{\partial f(x_i)}{\partial x_i} S_{x_i}$ – частная погрешность параметра x_i .

Погрешность (допуск) δ_Q параметра Q определяется следующим образом:

$$\delta_Q = 2tS_Q, \quad (12)$$

где t – относительная ширина доверительного интервала, выбираемая из таблиц нормированного нормального распределения в зависимости от значения доверительной вероятности (при $P = 0,9973$, величина $t = 3$).

Учитывая изложенное выше целесообразно рассчитывать допуск T_Q параметра Q следующим образом. Сначала по формулам (4.1) и (4.2) определяется погрешность δ_Q , с которой можно выполнить конструктивный параметр Q на оборудовании, предполагаемом для использования в первоначальном варианте технологического процесса изготовления фрезы. Если погрешность δ_Q превосходит допуск T_Q размера Q , то требования к точности выполнения размеров x , ужесточаются. Причем в первую очередь необходимо повышать точность тех размеров, которые согласно формуле (11) имеют наибольшую частную погрешность. Если погрешность δ_Q оказалась меньше допуска T_Q , то снижают требования к точности исполнения размеров, которые имеют наименьшую частную погрешность.

Более наглядно и объективно можно определить размеры, допуск которых необходимо корректировать, с помощью уравнения баланса относительных частных погрешностей:

$$1 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f(x_i)}{\partial x_i} \cdot \frac{S_{x_i}}{S_Q} \right)^2 = \sum_{i=1}^n \delta_{x_i}^2, \quad (13)$$

где $\delta_{x_i} = \frac{\partial f(x_i)}{\partial x_i} \cdot \frac{S_{x_i}}{S_Q}$ – относительная частная погрешность параметра x_i .

Квадрат относительной частной погрешности показывает, как интенсивно влияет эта погрешность на дисперсию конструктивного параметра. Оценив вклад каждого технологического параметра в погрешность конструктивного параметра, можно выявить наиболее сложные, с позиций обеспечения точности фрезы, операции технологического процесса изготовления ее режущей части.

Таким образом, если ЗРВ параметра Q соответствует нормальному, то расчет погрешности его изготовления значительно упрощается. Однако доказать совпадение ЗРВ параметра Q с нормальным законом строгими аналитическими методами весьма сложно. Поэтому в работе предлагается достаточно простой, но корректный метод установления близкого соответствия расчетного ЗРВ и его теоретической модели (нормальный ЗРВ) с помощью критерия согласия Пирсона.

Процедура проверки гипотезы проводится следующим образом. Пусть расчетная кривая распределения вероятности имеет некоторое сходство с нормальной кривой. Необходимо определить степень близости расчетного ЗРВ с нормальным распределением. Для этого можно воспользоваться критерием согласия χ^2 - Пирсона, который имеет вид:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \frac{N}{P_i} (P_i - P_i')^2, \quad (14)$$

где χ^2 - значение критерия Пирсона; P_i^* - теоретическая вероятность попадания значения Q в i -ый интервал гистограммы; P_i - расчетное значение вероятности попадания значения Q в i -ый интервал гистограммы; i - номер разряда гистограммы, $i = 1 \dots k$; N - число измерений.

Однако число измерений N , входящее в формулу критерия χ^2 неизвестно, т.к. мы имеем дело с расчетной кривой распределения, а не с результатами многократных измерений. Поэтому представим расчетную кривую в виде гистограммы и рассчитаем относительное значение критерия Пирсона $\chi_{\text{отн}}^2$, приходящееся на одно измерение, которое назовем условным:

$$\chi_{\text{отн}}^2 = \sum_{i=1}^k \frac{1}{P_i^*} (P_i - P_i^*)^2 = \frac{\chi^2}{N_y}, \quad (15)$$

где N_y - число условных измерений, при котором выдвинутая гипотеза еще будет непротиворечивой. Измерения называются условными потому, что расчетные вероятности P_i и кривая распределения искусственно унодобляется характеристикам, полученным эмпирически с некоторым числом измерений N_y .

Для расчета величины $\chi_{\text{отн}}^2$ имеются все данные: теоретическая вероятность P_i^* определяется по таблицам нормального распределения, а вероятность P_i - из результатов расчета ЗРВ.

Для того чтобы принять гипотезу, необходимо соблюдение условия:

$$\chi^2 \leq \chi_{\text{табл}}^2, \quad (16)$$

где $\chi_{\text{табл}}^2$ - табличное значение критерия Пирсона, соответствующее принятому уровню значимости $\alpha = 1 - P$ (P - доверительная вероятность) и числу степеней свободы $f = k - 3$.

Из выражений (15) и (16) можно определить число условных измерений, при котором в силу выполнения неравенства (16) гипотеза о соответствии расчетного ЗРВ теоретической модели еще будет непротиворечивой:

$$N_y \leq \chi_{\text{табл}}^2 / \chi_{\text{отн}}^2. \quad (17)$$

Если расчетная кривая распределения вероятности полностью совпадает с теоретической кривой, то $N_y \rightarrow \infty$, т.е. очень велико. Если получается, что $N_y \leq 50$, то гипотезу о соответствии расчетного ЗРВ теоретической модели следует однозначно отвергнуть, т.к. критерий Пирсона при $N_y \leq 50$ неэффективен, а степень расхождения расчетной и теоретической кривой будет быстро увеличиваться с ростом числа N_y . Принять гипотезу о том, что расчетный ЗРВ соответствует теоретической модели можно, если число возможных измерений N контролируемого параметра будет меньше N_y :

$$N \leq N_y. \quad (18)$$

Обычно достаточным оказывается значение $N_y > 100 \dots 150$. При $N_y = 50 \dots 100$ применение данной методики связано с риском недопустимо больших погрешностей расчета.

Расчетный ЗРВ конструктивного параметра дает представление о внешнем виде распределения его вероятности, но не дает численных значений величин \bar{Q} и S_Q . Эти характеристики необходимы для определения теоретических вероятностей P_i попадания значений параметра Q в i -ый интервал гистограммы, для их расчета целесообразно воспользоваться методом наименьших квадратов (МНК) и некоторыми особенностями нормального распределения, а именно линейностью связи между числовым Q_i и нормированным t_i значением i -го результата измерения:

$$t_i = (Q_i - \bar{Q})/S_Q. \quad (19)$$

Из уравнения (19) следует:

$$Q_i = \bar{Q} + t_i S_Q. \quad (20)$$

Величина t_i является нормированным аргументом расчетной интегральной функции распределения вероятности $F(Q_i)$, которую можно определить по таблицам для построения гистограмм распределений конструктивных параметров. Поскольку расчетная дифференциальная функция или гистограмма имеют вид, близкий к нормальному, для определения аргумента t_i необходимо воспользоваться таблицами нормального распределения. В нашем случае связь между нормированным t_i и ненормированным Q_i аргументами будет несколько отличаться от линейной, т.к. расчетный ЗРВ хоть и незначительно, но отличен от нормального. Спрямив с помощью МНК связь $Q_i = f(t_i)$, мы сможем определить числовые характеристики \bar{Q} и S_Q , которые в наибольшей степени соответствуют теоретической модели распределения вероятности, построенной на базе расчетного закона распределения вероятности. Наибольшее соответствие теоретической модели (нормальному ЗРВ) обусловлено тем, что: нормированный аргумент t_i определяется на основании приравнивания расчетной интегральной функции к функции нормального распределения; искажения линейной связи, характерные для нормального распределения, сглаживаются МНК.

Значения \bar{Q} и S_Q из уравнения (4.11) определяются по формулам:

$$\bar{Q} = \frac{\sum_{i=1}^k Q_i \cdot \sum_{i=1}^k t_i^2 - \sum_{i=1}^k Q_i t_i \cdot \sum_{i=1}^k t_i}{k \sum_{i=1}^k t_i^2 - (\sum_{i=1}^k t_i)^2}, \quad S_Q = \frac{k \sum_{i=1}^k Q_i t_i - \sum_{i=1}^k Q_i \cdot \sum_{i=1}^k t_i}{k \sum_{i=1}^k t_i^2 - (\sum_{i=1}^k t_i)^2}. \quad (21)$$

В работе этот метод определения числовых характеристик \bar{Q} и S_Q назван методом максимального соответствия теоретической модели.

По предложенной методике проведен анализ точности изготовления резьбовых гребенчатых и мелко модульных червячных фрез с винтовым затылованием.

В заключении сформулированы основные выводы и результаты работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. На основании проделанных исследований установлено, что без функционального преобразования ЗРВ технологических параметров корректное назначение полей допусков на эти и конструктивные параметры фрез с винтовым затылованием и других технических объектов крайне затруднительно, особенно если эти преобразования нелинейны.

Для решения этой задачи были разработаны общий метод расчета полей допусков, базирующийся на функциональном преобразовании ЗРВ входных параметров и упрощенная методика расчета полей допусков, эффективная при ЗРВ выходных параметров, близких к нормальному.

2. С целью расширения возможностей предложенного нами численного метода построения ЗРВ конструктивных параметров, разработаны два его варианта: интервальный и точечный.

Интервальный вариант имеет более высокую точность и широкие возможности представления полученного ЗРВ: в виде дифференциальной и интегральной кривой, а также в виде гистограммы и упрощенного варианта интегральной функции. Однако, ему присуща необходимость использования большого объема промежуточной информации, и, как следствие, более низкое по сравнению с точечным вариантом быстродействие.

Точечный вариант имеет возможность представления результатов расчета ЗРВ конструктивного параметра в виде гистограммы и упрощенного вида интегральной функции, но в силу названных выше причин - более высокое быстродействие.

3. Предложенный численный метод функционального преобразования ЗРВ имеет универсальный характер, т.е. может применяться для любых видов распределений вероятности входных параметров и функций $Q = f(x_1, \dots, x_1, \dots, x_n)$, связывающих эти и выходной параметры. Применение метода не ограничивает способ задания функции, связывающей входные и выходной параметры, поскольку он одинаково корректно работает в условиях, когда зависимость $Q = f(x_1, \dots, x_1, \dots, x_n)$ задается в явном, неявном и параметрическом видах.

4. Применение разработанного метода для расчета полей допусков важнейших конструктивных параметров на примере фрез с винтовым затылованием позволило установить следующее:

а) зависимости, связывающие технологические параметры с конструктивными, должны содержать только те параметры, точность которых может быть гарантирована паспортом оборудования или определена эмпирически. Не допускается упрощение этих зависимостей путем сокращения или взаимного уничтожения значений технологических параметров, имеющих одинаковые ЗРВ (математические ожидания и средние квадратические отклонения), но характеризующих различные технологические объекты, например, ход правой и левой винтовых поверхностей и др.;

б) погрешности конструктивных параметров в общем случае и для фрез с винтовым затылованием имеют различную структуру:

- простейшие погрешности, образующиеся непосредственно;
- погрешности накопления, получающиеся путем суммирования отдельных составляющих;
- погрешности, объединяющие совокупность отдельных составляющих.

Каждый из указанных видов погрешностей имеет свои индивидуальные особенности расчета;

в) расчетная точность резьбовых гребенчатых и мелко модульных червячных фрез с винтовым затылованием по важнейшим конструктивным параметрам значительно превосходит требования ГОСТ 1336-77 и ГОСТ 10331-81, что позволяет рекомендовать их к применению для обработки резьб и цилиндрических зубчатых колес, к которым предъявляются высокие требования по точности.

5. Распределения вероятностей всех рассмотренных конструктивных параметров фрез с винтовым затылованием близки к нормальному, что позволило предложить для расчета полей допусков на эти параметры упрощенную методику.

Для исключения возможностей некорректного ее применения нами разработан метод проверки гипотезы о близости расчетных ЗРВ конструктивных параметров каким-либо их теоретическим моделям, в том числе и нормальному распределению.

6. Сравнение результатов расчета погрешностей изготовления фрез с винтовым затылованием по важнейшим конструктивным параметрам общим и упрощенным методами показало их высокую сходимость, что свидетельствует о корректности, как самих методов расчета полей допусков конструктивных параметров, так и метода проверки гипотезы о близости расчетных ЗРВ конструктивных параметров их теоретическим моделям.

7. На основании предложенных методов расчета погрешностей изготовления фрез с винтовым затылованием создан ПМК «Расчет полей допусков конструктивных и технологических параметров фрез с винтовым затылованием», который был использован при расчете погрешностей изготовления фрез с винтовым затылованием для обработки резьб М12...М30 на ОАО АК «Туламашзавод» и в учебных курсах «Теоретическая метрология», «Прикладная метрология» и «Основы квалиметрии» кафедры «Инст-

рументальные и метрологические системы» Тульского государственного университета.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Соловьев С.И., Белов Д.Б. Прогнозирование погрешности изготовления инструмента по конструктивным параметрам. // Известия Тульского государственного университета. Серия машиностроение. Вып. 3. Часть 2. – Тула: ТулГУ, 1998. – с. 41-45.

2. Соловьев С.И., Белов Д.Б. Роль законов распределения вероятности в оценке эффективности уровня качества продукции на основе методов Тагута. // 5-я всероссийская научно-техническая конференция «Состояние и проблемы технических измерений». Тезисы докладов. – Москва, 1998. – с.380-381.

3. Соловьев С.И., Белов Д.Б. Функциональные преобразования законов распределения вероятности численными методами. // Дифференциальные уравнения и прикладные задачи: Сб. науч. тр. - Тула: ТулГУ, 1998. – с. 132-135.

4. Белов Д.Б., Соловьев С.И. Обработка результатов измерения методом «спрямления» исходных данных. // Дифференциальные уравнения и прикладные задачи: Сб. науч. тр. - Тула: ТулГУ, 1999. – с. 141-144.

5. Соловьев С.И., Белов Д.Б. Анализ точности технологических процессов изготовления деталей методом баланса погрешностей. // Теория, технология, оборудование и автоматизация обработки металлов давлением и резанием: Сб. науч. тр. Вып. 2. - Тула: ТулГУ, 1999. – с. 237-241.

6. Ушаков М.В., Соловьев С.И., Белов Д.Б. Анализ факторов, влияющих на точность изготовления инструмента. // Теория, технология, оборудование и автоматизация обработки металлов давлением и резанием: Сб. науч. тр. Вып. 1. - Тула: ТулГУ, 1999. – с. 237-241.

7. Соловьев С.И., Белов Д.Б. Определение случайных погрешностей результата измерения в зависимости от теоретической модели распределения вероятности. // 6-я всероссийская научно-техническая конференция «Состояние и проблемы технических измерений». Тезисы докладов. – Москва, 1999. – с.43-44.

8. Соловьев С.И., Белов Д.Б. Построение закона распределения вероятности расчетных величин. // 6-я всероссийская научно-техническая конференция «Состояние и проблемы технических измерений». Тезисы докладов. – Москва, 1999. – с.45.

9. Соловьев С.И., Белов Д.Б. Вероятностный метод назначения поля допуска на расчетные параметры режущего инструмента. // Журнал «Техника машиностроения». №4(22). – Москва: НТП «Вираз – центр», 1999. – с. 36-40.

10. Соловьев С.И., Белов Д.Б. Использование метода наименьших квадратов при обработке результатов измерений. // Журнал «Технология машиностроения». №2. – Москва, 2000. – с. 61-65.

11. Белов Д.Б. Оценка точностных возможностей технологических процессов методом баланса погрешностей. // Лучшие научные работы студентов и молодых ученых технологического факультета: Сб. статей. – Тула: ТулГУ, 2000. – с. 42-45.

12. Протасьев В.Б., Соловьев С.И., Белов Д.Б. Расчет статистических параметров технологического процесса и инструмента методом максимального приближения к теоретической модели. // 1-я международная конференция «Современные проблемы и методология проектирования силовых зубчатых передач». Сб. науч. тр. – Тула: ТулГУ, 2000. – с.219-222.

13. Протасьев В.Б., Соловьев С.И., Белов Д.Б. Применение законов распределения вероятности при предельном контроле зубчатых колес. // 1-я международная конференция «Современные проблемы и методология проектирования силовых зубчатых передач». Сб. науч. тр. – Тула: ТулГУ, 2000. – с.222-225.

14. Протасьев В.Б., Соловьев С.И., Белов Д.Б. Влияние погрешностей технологических параметров на точность профиля гребенчатой фрезы с винтовым затылованием для обработки зубчатых колес. // 1-я международная конференция «Современные проблемы и методология проектирования силовых зубчатых передач». Сб. науч. тр. – Тула: ТулГУ, 2000. – с.225-227.

Подписано в печать 13.11.00. Формат бумаги 60x84 1/16. Бумага типографская №2
Офсетная печать. Усл. печ. л. 1,1. Усл. кр.-отт. 1,1. Уч. изд. л. 1,0.

Тираж 100 экз. Заказ 695.

Тульский государственный университет. 300600, г. Тула, пр. Ленина, 92.

Редакционно-издательский центр Тульского государственного университета.

300600, г. Тула, ул. Болдина, 151