

УДК 621.317+621.753

В.А. Дербаба, В.И. Корсун, С.Т. Пацера

Национальный горный университет, Днепрпетровск, Украина

СТАТИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТОЧНОСТИ ЗУБООБРАБОТКИ И ИЗМЕРЕНИЙ ТОЛЩИНЫ ЗУБА С УЧЕТОМ ИНТЕРВАЛЬНОЙ МЕРЫ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО СРЕДСТВА

Определена зависимость риска изготовителя от точности обработки диаметра вершин зубьев, точности формообразования зубьев по толщине и расширенной неопределенности измерительного средства. Используется имитационное статистическое моделирование. В строках электронной таблицы моделируются различные зубья, а в столбцах – последовательно диаметр вершин зубьев, значения толщин зубьев, оценка годности по двухбалльной шкале, различная погрешность измерения при использовании выбранного средства измерения, суммарный результат изготовления и измерения, процент годных зубьев. Методика предназначена для обучения магистров (технологов и метрологов), а также для исследований.

Ключевые слова: зубчатое колесо, толщина зуба, неопределенность, погрешность, отклонение, процент неправильно забракованных зубьев.

Введение

Постановка проблемы. В зависимости от маршрута обработки зубчатого колеса и его контроля возможен один из четырех вариантов требований к наружному диаметру заготовки: наружный цилиндр заготовки используется в качестве базы для контроля размеров зубьев колеса (измерение штангензубомером толщины зубьев) [1]. Известно [3], что в этом случае контроля размеров зубьев должны быть:

- ограничены предельные отклонения диаметра окружности выступов, которые зависят от степени точности зубчатого колеса, или

- внесены поправки на действительный размер диаметра окружности выступов (при этом требования к величине предельной погрешности измерительного средства не оговорены).

Из приведенных в табл. 1 данных [3] видно, что для разных степеней точности зубчатых колес допускаются назначения одного и того же качества точности для диаметра наружного цилиндра (окружности выступов).

Для управления уровнем качества обработки желательно иметь зависимости уровня дефектности зубьев от принятых качеств точности диаметра вершин зубьев при различных степенях точности зубчатых колес.

Таблица 1

| Наименование элементов | Требования к точности заготовок [3] | | | | | | |
|----------------------------|-------------------------------------|---|---|---|---|---|----|
| | Степень точности зубчатых колес | | | | | | |
| | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| | Квалитеты точности | | | | | | |
| Диаметр наружного цилиндра | 7 | 7 | 8 | 8 | 8 | 9 | 9 |

Анализ последних достижений и публикаций. В ряде работ [4-7] для количественной оценки влияния технологических и метрологических факторов на дефектность изделий применен метод имитационного статистического моделирования процессов изготовления и измерения.

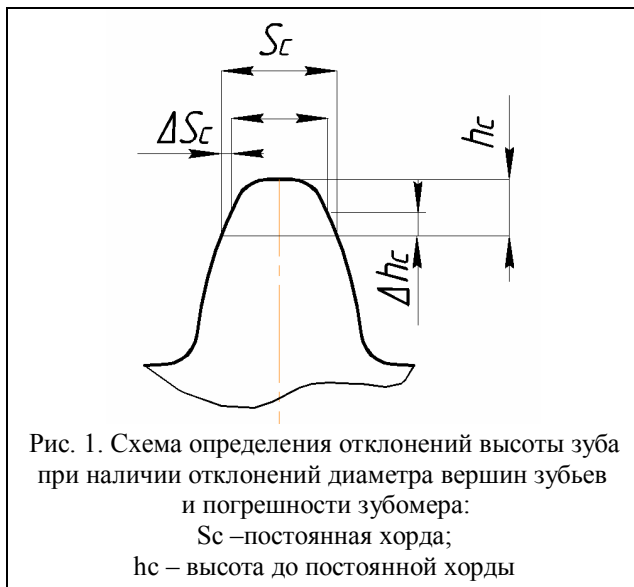
В этих работах изложена методика статистического моделирования, которая предусматривает моделирование с помощью электронных таблиц процесса изготовления, контроля и разбраковки различных изделий. В работе [6,7] исследовано влияние расширенной неопределенности измерительных средств на показатели дефектности зубчатых колес, когда критерием качества выбрано *отклонение толщины зуба*.

Формулирование цели. Количественная оценка влияния на показатели дефектности интервальной меры неопределенности зубомера в сочетании с влиянием допускаемых отклонений диаметра вершин зубьев для случая контроля толщины зубьев колеса на базе наружного цилиндра заготовки без учета его действительного размера может быть проведена методом статистического моделирования.

Изложение основного материала

В отличие от работы [7] одновременно со статистическим моделированием толщины зуба так же моделируются случайные отклонения размеров диаметра вершин зубьев (фрагмент показан далее в табл. 2).

В качестве контролируемого параметра выбрано отклонение толщины зуба, наименьшее значение которого – E_{cs} , является показателем, определяющим гарантируемый боковой зазор, который, в свою очередь, определяет вид сопряжения [3]. Наименьшее отклонение толщины зуба – E_{cs} – наименьшее предписанное уменьшение постоянной хорды S_c (рис. 1).



Измерительной базой для определения высоты зуба h_c является номинальный диаметр окружности выступов. Из рис. 1 видно, что если окружность выступов не будет выполнена в номинале, то высота зуба будет определена с погрешностью Δh_c . Это приводит к погрешности измерения толщины зуба ΔS_c .

Исследования проведены на примере конкретного цилиндрического прямозубого колеса. Колесо имеет следующие конструктивные параметры и допуски [3]:

- модуль $m = 3$ мм;
- делительный диаметр $d = 150$ мм;
- число зубьев $z = 50$;
- номинальное значение постоянной хорды $S_s = 4,161$ мм;
- номинальное значение высоты до постоянной хорды $h_s = 2,243$ мм;
- наименьшее отклонение толщины зуба $E_{cs} = 12$ мкм [3];
- допуск на толщину зуба $T_c = 35$ мкм.

Имитационная электронная таблица включает в себя строки, в каждой из которых записаны номера зубчатых колес, для которых определяются:

- результаты моделирования истинного отклонения толщины зуба, обусловленного выбором оборудования и режущего инструмента);
- результаты статистического моделирования исследуемых погрешностей.

В столбце 1 моделируются порядковые номера зубчатых колес, для которых определяется толщина

зубьев. В столбце 2 моделируется истинное отклонение толщины зубьев E_{cs} , полученное при принятых параметрах точности технологии.

Компьютерное моделирование позволяет моделировать истинное значение, что в реальных условиях изготовления неосуществимо [8, стр. 14]. Для моделирования истинного отклонения толщины зуба использован пакет анализа, входящий состав программы Microsoft Excel, предназначенный для решения сложных статистических и инженерных задач. В диалоговом окне из пакета «Анализ данных» – «Генерация случайных чисел» заполняем соответствующие поля [7]:

- число переменных – 1 (истинное отклонение толщины зуба);
- число случайных чисел – 50 (соответствует количеству зубьев в колесе);
- распределение – нормальное (предполагаем, что нет доминирующих факторов, влияющих на отклонение от среднего значения);
- параметры распределения – среднее значение и стандартное отклонение.

Среднее значение отклонения толщины зуба принято равным координате середины поля допуска на толщину зуба:

$$E_{csi\text{ ср}} = -12 - \frac{35}{2} = -29,5 \text{ мкм.}$$

Этим самым предполагается высокий уровень настроенности технологического процесса изготовления (может также моделироваться низкий уровень настроенности).

Стандартное отклонение может быть смоделировано для технологических процессов, отличающихся по уровню точности [7] :

- пониженной точности, при которой отношение величины поля допуска к стандартному отклонению менее 6;
- нормальной точности, при которой отношение величины поля допуска к стандартному отклонению равно 6;
- повышенной точности, при которой отношение величины поля допуска к стандартному отклонению более 6 .

В примере, приведенном в табл.2, принят нормальный уровень точности технологии, при котором указанное отношение равно 6 . Тогда стандартное отклонение

$$\sigma = \frac{T_c}{4} = \frac{35}{6} = 5,8 \text{ мкм.}$$

Выводным интервалом является столбец 2.

В столбце 3 проводится оценка годности зубьев по двухбалльной шкале: годным присваивается балл $\beta_n = \langle 1 \rangle$, а бракованным соответственно балл $\beta_n = \langle 0 \rangle$. Годными считаем зубья, у которых истинное значение отклонения толщины зуба находится в поле допуска.

Таблиця 2

Электронная таблица имитационного статистического моделирования процесса изготовления, контроля и разбраковки зубчатого колеса со следующими параметрами: степень точности 6; вид сопряжения H, интервальная мера неопределенности измерительного прибора 10 мкм (для сокращения объема таблицы показаны не все строки)

| Номер зубчатого колеса | Истинное отклонение толщины зуба, обусловленное выбором оборудования и режущего инструмента | Оценка годности зуба по критерию толщины | Отклонение диаметра вершин зубьев от номинального размера, мкм | Погрешность измерения высоты зуба (влияние интервальной меры неопределенности зубомера), мкм | Сумма столбцов 4 и 5 | Отклонение измеряемой толщины зуба от номинала (вызванное эвольвентным профилем зуба), мкм | Погрешность измерения толщины зуба (влияние интервальной меры неопределенности зубомера), мкм | Действительное отклонение толщины зуба (сумма столбцов 2, 7, 8), мкм | Оценка годности зуба по критерию толщины (с учетом влияния изучаемых факторов) | Правильно забракованные зубья | Неправильно забракованные зубья | Правильно принятые зубья | Неправильно принятые зубья |
|------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|--------------------------|----------------------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
| №1 | -30 | 1 | -14 | 7 | -7 | -3 | -8 | -41 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| №21 | -34 | 1 | -15 | -4 | -19 | -7 | -8 | -49 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| №32 | -33 | 1 | -16 | -4 | -20 | -7 | 0 | -40 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| №47 | -32 | 1 | -16 | -7 | -23 | -8 | 3 | -38 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| Всего, % | 100 | | | | | | | | 90 | 0 | 10 | 90 | 0 |

Тогда для компьютерного заполнения столбца 3 используется формула

$$\text{ЕСЛИ}(\text{И}(\text{E}_{\text{CSH}} \leq \text{E}_{\text{CS}}; \text{E}_{\text{CSH}} \geq (\text{E}_{\text{CS}} - \text{T}_c); 1; 0),$$

где E_{CSH} – истинное отклонение толщины зуба; E_{CS} , T_c – соответственно наименьшее отклонение толщины зуба и допуск на отклонение толщины зуба – нормированные показатели точности, заданные в стандарте на зубчатые колеса [3].

Сумма баллов в столбце 3 (50 из 50 зубьев) отображает долю годных зубьев при выбранной для моделирования точности технологии, т.е. 100%.

В столбце 4 моделируются отклонения диаметра вершин зубьев от номинального размера, мкм.

Возможны различные варианты назначения качества точности диаметра вершин зубьев, в том числе, предусмотренные в табл. 1.

В столбце 5 отображаются результаты моделирования погрешности измерения высоты зуба (влияния интервальной меры неопределенности зубомера). Рассматривались следующие варианты предельных погрешностей зубомеров: 0, 2, 10, 50 мкм. В случае варианта с нулевой предельной погрешностью измерительного прибора оцениваются показате-

ли дефектности зубьев только от величины качества точности окружности выступов.

В столбце 6 оценивается суммарное смещение измерительной базы высоты зуба от отклонения диаметра вершин зубьев и погрешности прибора.

В столбце 7 вычисляется отклонение толщины зуба от номинального значения, обусловленное суммарным смещением измерительной базы с учетом эвольвентного профиля боковой поверхности зуба.

Для этой цели графоаналитическим методом построена боковая поверхность зуба и аппроксимирована величина отклонения измеренной толщины зуба от номинала Δ_S в зависимости от смещения измерительной базы высоты зуба Δ_h . Для рассматриваемого примера эта зависимость описывается формулой

$$\Delta_S = 0,3642\Delta_h .$$

В столбце 8 показаны результаты моделирования погрешности измерения толщины зуба (влияния интервальной меры неопределенности зубомера). Рассматривались следующие варианты предельных погрешностей зубомеров: 0, 2, 10, 50 мкм.

Действительное отклонение толщины зуба (столбец 9) определяется суммированием трех составляющих:

- отклонения толщины зуба, обусловленного выбором оборудования и режущего инструмента (столбец 2);
- отклонения измеряемой толщины зуба от номинала, вызванного эвольвентным профилем зуба (столбец 7), мкм;
- погрешности измерения высоты зуба, обусловленного влиянием интервальной меры неопределенности зубомера (столбец 8).

Оценка годности зуба по критерию толщины с учетом влияния перечисленных факторов проведена в столбце 10 по двухбалльной шкале: годным присваивается балл $\beta_d = \langle 1 \rangle$, а бракованным соответственно балл $\beta_d = \langle 0 \rangle$.

Годными считаем зубья, у которых действительное значение отклонения толщины зуба находится в поле допуска.

Тогда для компьютерного заполнения столбца 10 используется формула

$$\text{ЕСЛИ}(\text{И}(E_{\text{сд}} \leq E_{\text{с}}; E_{\text{сд}} \geq (E_{\text{с}} - T_{\text{с}}); 1; 0),$$

где $E_{\text{сд}}$ – действительное отклонение толщины зуба; $E_{\text{с}}$, $T_{\text{с}}$ – соответственно наименьшее отклонение толщины зуба и допуск на отклонение толщины зуба – нормированные показатели точности, заданные в стандарте на зубчатые колеса [3].

Для моделирования в столбцах 5 и 8 используется инструмент пакета анализа в EXCEL – «Генерация случайных чисел». При заполнении соответствующего диалогового окна принято:

- число переменных 1;
- число случайных чисел 50;
- распределение равномерное, называемое также прямоугольным (можно также имитировать и другие распределения).

Для осуществления компьютерного моделирования необходимо заполнить поля диалогового окна: «от» и «до». Здесь следует ввести значение U интервальной меры неопределенности [8, стр. 72], которая указана в паспорте измерительного средства.

Для получения искомых зависимостей U моделировалось в широком диапазоне: от ± 50 до 0 мкм (в табл. 2 показаны результаты только для $U = \pm 10$ мкм).

Сумма баллов в столбце 10 отображает долю годных зубьев при данной точности технологии с учетом влияния рассмотренных факторов. Сопоставление суммы баллов в столбцах 2 и 10 наглядно демонстрирует, что погрешность измерения существенно снизила процент годных зубьев (в нашем примере на 10%).

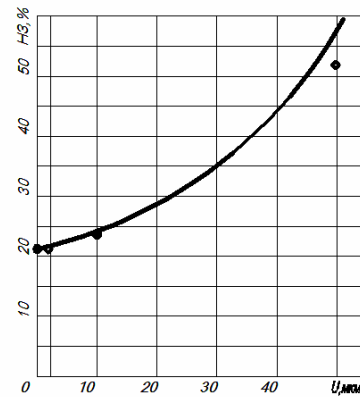


Рис. 2. Зависимость процента неправильно забракованных зубьев (НЗ) от интервальной меры неопределенности зубомера U при 8 квалитете точности диаметра вершин зубьев степени точности 6Н

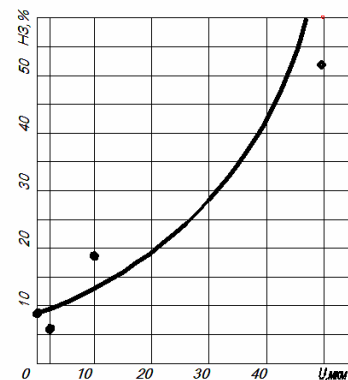


Рис. 3. Зависимость процента неправильно забракованных зубьев (НЗ) от интервальной меры неопределенности зубомера U при 7 квалитете точности диаметра вершин зубьев степени точности 6Н

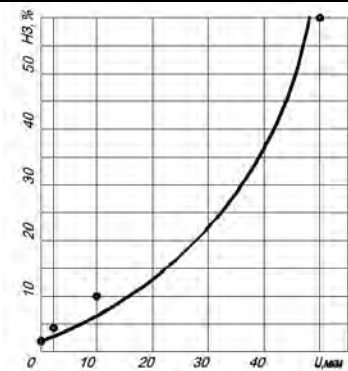


Рис. 4. Зависимость процента неправильно забракованных зубьев (НЗ) от интервальной меры неопределенности зубомера U при 6 квалитете точности диаметра вершин зубьев степени точности 6Н

Далее проводится выявление процента неправильно забракованных зубьев.

Правильно забракованные зубья (ПЗ) должны иметь балл «0», как в столбце 2, так и в столбце 10. Для моделирования применена формула

$$\text{ЕСЛИ}(\text{И}(\beta_{\text{и}} = 0; \beta_{\text{д}} = 0); 1; 0).$$

Неправильно забракованні зубья (НЗ) повинні мати бал «1» в стовбці 2, і бал «0» в стовбці 10. В цьому випадку застосована формула

$$\text{ЕСЛИ}(\text{И}(\beta_{\text{и}} = 1; \beta_{\text{д}} = 0); 1; 0).$$

Правильно прийняті деталі (ПП) повинні мати бал «1» як в стовбці 2, так і в стовбці 10. Застосовується формула

$$\text{ЕСЛИ}(\text{И}(\beta_{\text{и}} = 1; \beta_{\text{д}} = 1); 1; 0).$$

Неправильно прийняті деталі (НП) повинні мати бал «0» в стовбці 2, і «1» бал в стовбці 10. Для моделювання застосована формула

$$\text{ЕСЛИ}(\text{И}(\beta_{\text{и}} = 0; \beta_{\text{д}} = 1); 1; 0).$$

Сума балів (0, 5, 45, 0) в стовбцях 11÷14 відображає відповідні показники дефектності.

Аналогічні дані отримані для 5 і 7 квалітетів точності діаметра вершин зубів.

Выводы

Показано, що наявні в технічній літературі рекомендації по призначенню квалітету точності діаметра вершин зубів не забезпечують задовільних показників дефектності при контролі товщини зубів.

При 7 і 8 ступенях точності зубчатих колес евольвентного зацеплення для контролю товщини зуба зубчатого колеса можна рекомендувати зубоміри, що мають інтервальну міру неопределенності $U = \pm 2$ мкм.

При цьому квалітет точності діаметра вершин зубів необхідно зменшити на 1-2 номери порівняно з тим, що рекомендується в технічній літературі.

Список литературы

1. Тайц Б.А. Точность и контроль зубчатых колес / Б.А.Тайц. – М.: Машиностроение, 1972. – 368 с.
2. Взаимозаменяемость и технические измерения в машиностроении / Б.С. Балакишин и др. – М.: Машиностроение, 1972. – 615 с.
3. Допуски и посадки. Справочник. В 2-х ч. / В.Д. Мягков, М.А. Палей, А.Б. Романов, В.А. Брагинский. – 6-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение, Ленинградское отделение, 1983. – Ч. 2. – 448 с.
4. Пацера С.Т. Изучение влияния расширенной неопределенности второго рода на риски изготовителя и заказчика методом статистического моделирования / С.Т. Пацера, В.И. Корсун, С.С. Курдюков // Системи обробки інформації: зб. наук. пр. – Х.: ХУПС, 2006. – Вип. 7 (56). – С. 62-65.
5. Метод статистического моделирования при изучении влияния расширенной неопределенности на риски заказчика и изготовителя метрической резьбы / А.В. Азаров, А.Л. Войчишин, В.И. Корсун, С.Т. Пацера // Системи обробки інформації: зб. наук. пр. – Х.: ХУПС, 2009. – Вип. 5 (79). – С. 78-81.
6. Дербабя В.А. Влияние расширенной неопределенности на риски изготовителя и заказчика при измерении длины общей нормали зубчатого колеса / В.А. Дербабя, В.И. Корсун, С.Т. Пацера // Системи обробки інформації: зб. наук. пр. – Х.: ХУПС, 2010. – Вип. 4 (85). – С. 148-150.
7. Дербабя В.А. Влияние расширенной неопределенности на риски изготовителя и заказчика при измерении толщины зуба / В.А. Дербабя, В.И. Корсун, С.Т. Пацера // Системи обробки інформації: зб. наук. пр. – Х.: ХУПС, 2011. – Вип. 1 (91). – С. 57-61.
8. Захаров И.П. Теория неопределенности в измерениях: учеб. пособие / И.П. Захаров, В.Д. Кукуш. – Х.: Консум, 2002. – 256 с.

Поступила в редколлегию 11.01.2012

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Р.П. Дидык, Национальный горный университет, Днепрпетровск, Украина.

СТАТИСТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТОЧНОСТІ ОБРОБКИ ЗУБЦІВ ТА ВИМІРЮВАННЯ ТОВЩИНИ ЗУБЦЯ З УРАХУВАННЯМ ІНТЕРВАЛЬНОЇ МІРИ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ВИМІРЮВАЛЬНОГО ЗАСОБУ

В.А. Дербабя, В.И. Корсун, С.Т. Пацера

Визначена залежність ризику виробника від точності обробки діаметра вершин зубів, точності формування зубів по товщині і розширеній невизначеності вимірювального засобу. Використано імітаційне статистичне моделювання. В рядках електронної таблиці моделюється різні зубці, а у стовбцях – послідовно діаметр вершин зубів, значення товщини зубів, оцінка придатності по двоохальної шкалі, різна дійсна похибка вимірювань при використанні вибраного засобу вимірювання, загальний результат виготовлення та вимірювання, відсоток придатних зубців. Методика призначена для навчання магістрів (технологів та метрологів), а також для досліджень.

Ключові слова: зубчасте колесо, товщина зубця, невизначеність, похибка, відхилення, відсоток неправильно забракованих зубців.

INFLUENCE OF THE EXPANDED UNCERTAINTY ON RISKS OF THE MANUFACTURER AND THE CUSTOMER OF THE THICKNESS OF THE TOOTH GEAR

A.V. Derbaba, V.I. Korsun, S.T. Patsera

The dependence of the risk of manufacturer is certain on the extended uncertainty of measuring mean. An imitation statistical design is used. In lines of a spreadsheet process of manufacturing and the control of a gear wheel is modeled. In columns are modeled: the serial number, the true amount, the estimation of the conformance on a two-point scale, the varies valid error of measurements at use of the chosen gauge, the total result of manufacturing and measurement, the percent of conformance details. Methods are intended for teaching of master's degrees (technologists and metrologists), and also for researches.

Keywords: gear wheel, the thickness of a tooth, uncertainty, an error, a deviation, the percent of incorrectly discarded teeth.